

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Assessment of power density of human exposure to radio frequency fields from wireless devices in close proximity to the head and body (frequency range of 6 GHz to 300 GHz) –

Part 1: Measurement procedure

Évaluation de la densité de puissance de l'exposition humaine aux champs radiofréquences provenant de dispositifs sans fil à proximité immédiate de la tête et du corps (plage de fréquences de 6 GHz à 300 GHz) –

Partie 1: Procédure de mesure



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2022 IEC, Geneva, Switzerland

Copyright © 2022 IEEE

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing being secured. Requests for permission to reproduce should be addressed to either IEC at the address below or IEC's member National Committee in the country of the requester or from IEEE.

IEC Secretariat
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Tel.: +41 22 919 02 11
info@iec.ch
www.iec.ch

Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
3 Park Avenue
New York, NY 10016-5997
United States of America
stds.ipr@ieee.org
www.ieee.org

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigendum or an amendment might have been published.

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee, ...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and once a month by email.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: sales@iec.ch.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 300 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 19 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études, ...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et une fois par mois par email.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: sales@iec.ch.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 300 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 19 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Assessment of power density of human exposure to radio frequency fields from wireless devices in close proximity to the head and body (frequency range of 6 GHz to 300 GHz) –
Part 1: Measurement procedure**

**Évaluation de la densité de puissance de l'exposition humaine aux champs radiofréquences provenant de dispositifs sans fil à proximité immédiate de la tête et du corps (plage de fréquences de 6 GHz à 300 GHz) –
Partie 1: Procédure de mesure**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 17.220.20

ISBN 978-2-8322-0123-7

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

CONTENTS

FOREWORD.....	9
INTRODUCTION.....	11
1 Scope.....	12
2 Normative references	13
3 Terms and definitions	13
3.1 Exposure metrics and parameters.....	13
3.2 Spatial, physical, and geometrical parameters associated with exposure metrics.....	16
3.3 Measurement instrumentation, field probe, and data-processing parameters.....	17
3.4 RF power parameters	20
3.5 Test device technical operating and antenna parameters	21
3.6 Test device physical configurations.....	23
3.7 Uncertainty parameters.....	24
4 Symbols and abbreviated terms.....	25
4.1 Symbols.....	25
4.1.1 Physical quantities.....	25
4.1.2 Constants	26
4.2 Abbreviated terms.....	26
5 Quick start guide and application of this document.....	27
5.1 Quick start guide.....	27
5.2 Application of this document	30
5.3 Stipulations.....	30
6 Measurement system and laboratory requirements	30
6.1 General requirements	30
6.2 Laboratory requirements.....	31
6.3 Field probe requirements.....	32
6.4 Measurement instrumentation requirements.....	32
6.5 Scanning system requirements	33
6.5.1 Single-probe systems	33
6.5.2 Multiple field-probe systems	33
6.6 Device holder requirements	34
6.7 Post-processing quantities, procedures, and requirements.....	35
6.7.1 Formulas for calculation of sPD	35
6.7.2 Post-processing procedure	37
6.7.3 Requirements	38
7 Protocol for PD assessment	39
7.1 General.....	39
7.2 Measurement preparation	39
7.2.1 Relative system check	39
7.2.2 DUT requirements	39
7.2.3 DUT preparation.....	40
7.2.4 Selecting evaluation surfaces	41
7.3 Tests to be performed.....	44
7.3.1 General	44
7.3.2 Tests to be performed when supported by simulations of the antenna array.....	46
7.3.3 Tests to be performed by measurements of the antenna array.....	48

7.4	Measurement procedure	48
7.4.1	General measurement procedure	48
7.4.2	Power density assessment methods	49
7.4.3	Power scaling for operating mode and channel	51
7.4.4	Correction for DUT drift	53
7.5	Exposure combining	54
7.5.1	General	54
7.5.2	Combining power density and SAR results	55
8	Uncertainty estimation	58
8.1	General	58
8.2	Requirements for uncertainty evaluations	58
8.3	Description of uncertainty models	58
8.4	Uncertainty terms dependent on the measurement system	59
8.4.1	<i>CAL</i> – Calibration of the measurement equipment	59
8.4.2	<i>COR</i> – Probe correction	59
8.4.3	<i>FRS</i> – Frequency response	59
8.4.4	<i>SCC</i> – Sensor cross coupling	60
8.4.5	<i>ISO</i> – Isotropy	61
8.4.6	<i>LIN</i> – System linearity error	61
8.4.7	<i>PSC</i> – Probe scattering	61
8.4.8	<i>PPO</i> – Probe positioning offset	62
8.4.9	<i>PPR</i> – Probe positioning repeatability	62
8.4.10	<i>SMO</i> – Sensor mechanical offset	63
8.4.11	<i>PSR</i> – Probe spatial resolution	63
8.4.12	<i>FLD</i> – Field impedance dependence (ratio $ E / H $)	63
8.4.13	<i>MED</i> – Measurement drift	63
8.4.14	<i>APN</i> – Amplitude and phase noise	64
8.4.15	<i>TR</i> – Measurement area truncation	64
8.4.16	<i>DAQ</i> – Data acquisition	64
8.4.17	<i>SMP</i> – Sampling	64
8.4.18	<i>REC</i> – Field reconstruction	64
8.4.19	<i>SNR</i> – Signal-to-noise ratio	65
8.4.20	<i>TRA</i> – Forward transformation and backward transformation	65
8.4.21	<i>SCA</i> – Power density scaling	66
8.4.22	<i>SAV</i> – Spatial averaging	66
8.4.23	<i>COM</i> – Exposure combining	66
8.5	Uncertainty terms dependent on the DUT and environmental factors	66
8.5.1	<i>PC</i> – Probe coupling with DUT	66
8.5.2	<i>MOD</i> – Modulation response	67
8.5.3	<i>IT</i> – Integration time	67
8.5.4	<i>RT</i> – Response time	68
8.5.5	<i>DH</i> – Device holder influence	68
8.5.6	<i>DA</i> – DUT alignment	68
8.5.7	<i>AC</i> – RF ambient conditions	68
8.5.8	<i>TEM</i> – Laboratory temperature	68
8.5.9	<i>REF</i> – Reflections in laboratory	69
8.5.10	<i>MSI</i> – Measurement system immunity/secondary reception	69
8.5.11	<i>DRI</i> – DUT drift	69
8.6	Combined and expanded uncertainty	69

9	Measurement report	73
9.1	General.....	73
9.2	Items to be recorded in measurement reports	73
Annex A	(normative) Measurement system check and system validation tests	76
A.1	Overview	76
A.2	Normalization to total radiated power	77
A.2.1	General	77
A.2.2	Option 1: Accepted power measurement.....	77
A.2.3	Option 2: Total radiated power measurement.....	81
A.3	Relative system check	82
A.3.1	Purpose	82
A.3.2	Antenna and test conditions.....	82
A.3.3	Procedure.....	83
A.3.4	Acceptance criteria	83
A.4	Absolute system check	85
A.4.1	Purpose	85
A.4.2	Antenna and test conditions.....	85
A.4.3	Procedure.....	85
A.4.4	Acceptance criteria	85
A.5	System validation.....	86
A.5.1	Purpose	86
A.5.2	Procedure.....	86
A.5.3	Validation of modulation response	87
A.5.4	Acceptance criteria	87
Annex B	(normative) Antennas for system check and system validation tests	89
B.1	General.....	89
B.2	Pyramidal horn antennas for system checks	90
B.3	Cavity-fed dipole arrays for system validation	91
B.3.1	Description	91
B.3.2	Numerical target values for cavity-fed dipole arrays.....	94
B.3.3	Field and power density distribution patterns	94
B.3.4	Far-field radiation patterns.....	99
B.4	Pyramidal horns with slot arrays for system validation	101
B.4.1	Description	101
B.4.2	Numerical target values for pyramidal horns loaded with a slot array	103
B.4.3	Field and power density distribution patterns	104
B.4.4	Far-field radiation patterns.....	109
B.5	Antenna validation procedure.....	110
B.5.1	General	110
B.5.2	Objectives, scope, and usage specifications	111
B.5.3	Antenna design.....	111
B.5.4	Numerical targets	111
B.5.5	Reference antennas calibration	111
B.5.6	Antenna verification and life expectation.....	111
B.5.7	Uncertainty budget considerations	111
B.6	Validation procedure for wideband signals	112
B.6.1	General	112
B.6.2	Validation signals	112
B.6.3	Validation antennas and setup.....	112

B.6.4	Target values for validation antennas transmitting wideband signals	112
B.6.5	Wideband signal uncertainty	112
B.6.6	Validation procedure	113
Annex C	(normative) Calibration and characterization of measurement probes	114
C.1	General	114
C.2	Calibration of waveguide probes	114
C.2.1	General	114
C.2.2	Sensitivity	114
C.2.3	Linearity	114
C.2.4	Lower detection limit	115
C.2.5	Isotropy	115
C.2.6	Response time	115
C.3	Calibration for isotropic scalar E-field or H-field probes	115
C.3.1	General	115
C.3.2	Sensitivity	115
C.3.3	Isotropy	115
C.3.4	Linearity	116
C.3.5	Lower detection limit	116
C.3.6	Response time	116
C.4	Calibration of phasor E-field or H-field probes	116
C.4.1	General	116
C.4.2	Sensitivity	116
C.4.3	Isotropy	117
C.4.4	Linearity	117
C.4.5	Lower detection limit	117
C.5	Calibration uncertainty parameters	117
C.5.1	General	117
C.5.2	Input power to the antenna	117
C.5.3	Mismatch effect (input power measurement)	117
C.5.4	Gain and offset distance	118
C.5.5	Signal spectrum	118
C.5.6	Setup stability	118
C.5.7	Uncertainty for field impedance variations	119
C.6	Uncertainty budget template	119
Annex D	(informative) Information on use of square or circular shapes for power density averaging area in conformity evaluations	121
D.1	General	121
D.2	Method using computational analysis	121
D.3	Areas averaged with square and circular shapes on planar evaluation surface	121
D.4	Areas averaged with square and circular shapes on nonplanar evaluation surface	123
Annex E	(informative) Reconstruction algorithms	125
E.1	General	125
E.2	Methodologies to extract local field components and power densities	125
E.2.1	General	125
E.2.2	Phase-less approaches	126
E.2.3	Approaches using E-field polarization ellipse measurements	126
E.2.4	Direct near-field measurements	126

E.3	Forward transformation (propagation) of the fields	127
E.3.1	General	127
E.3.2	Field expansion methods	128
E.3.3	Field integral equation methods	128
E.4	Backward transformation (propagation) of the fields	129
E.4.1	General	129
E.4.2	Field expansion methods – the plane wave expansion	129
E.4.3	Inverse source methods	130
E.5	Analytical reference functions	131
Annex F	(normative) Interlaboratory comparisons	133
F.1	Purpose	133
F.2	Reference devices	133
F.3	Power setup	133
F.4	Interlaboratory comparison – procedure	133
Annex G	(informative) PD test and verification example	134
G.1	Purpose	134
G.2	DUT overview	134
G.3	Test system verification	134
G.4	Test setup	134
G.5	Power density results	134
G.6	Combined exposure (Total Exposure Ratio)	134
Annex H	(informative) Applicability of plane-wave equivalent approximations	135
H.1	Objective	135
H.2	Method	135
H.3	Results	135
H.4	Discussion	137
Annex I	(informative) Rationales for concepts and methods applied in this document and IEC/IEEE 63195-2	138
I.1	Frequency range	138
I.2	Calculation of sPD	138
I.2.1	Application of the Poynting vector for calculation of incident power density	138
I.2.2	Averaging area	139
Bibliography		140
Figure 1	– Quick Start Guide	29
Figure 2	– Simplified view of a generic measurement setup involving the use of reconstruction algorithms	38
Figure 3	– Cross-sectional view of SAM phantom for SAR evaluations at the reference plane, as described in IEC/IEEE 62209-1528:2020	42
Figure 4	– Cross-sectional view of SAM virtual phantom for PD evaluations at the reference plane (shell thickness is 2 mm everywhere, including at the pinna)	42
Figure 5	– Example reference coordinate system for the left-ear ERP of the SAM phantom	44
Figure 6	– Example reference points and vertical and horizontal lines on a DUT	44
Figure 7	– Flow chart for test procedure in 7.3	46
Figure 8	– Flow chart for general measurement procedure in 7.4.1	49
Figure 9	– Flow chart for power density assessment methods in 7.4.2	50

Figure 10 – SAR and power density evaluation at a point r	57
Figure 11 – Combining SAR (top) and power density (bottom) for the SAM phantom	57
Figure A.1 – Recommended accepted power measurement setup for relative system check, absolute system check and system validation	78
Figure A.2 – Equipment setup for measurement of forward power P_f and forward coupled power P_{fc}	78
Figure A.3 – Equipment setup for measuring the shorted reverse coupled power P_{rcs}	78
Figure A.4 – Equipment setup for measuring the power with the reference antenna	79
Figure A.5 – Port numbering for the S -parameter measurements of the directional coupler	80
Figure B.1 – Main dimensions for the cavity-fed dipole arrays – 30 GHz design	92
Figure B.2 – 10 GHz patterns of $ E_{total} $ and $Re\{S\}_{total}$ for the cavity-fed dipole arrays at distances of a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, and d) 50 mm from the upper surface of the dielectric substrate	95
Figure B.3 – 30 GHz patterns of $ E_{total} $ and $Re\{S\}_{total}$ for the cavity-fed dipole arrays at distances of a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, and d) 50 mm from the upper surface of the dielectric substrate	96
Figure B.4 – 60 GHz patterns of $ E_{total} $ and $Re\{S\}_{total}$ for the cavity-fed dipole arrays at distances of a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, and d) 50 mm from the upper surface of the dielectric substrate	97
Figure B.5 – 90 GHz patterns of $ E_{total} $ and $Re\{S\}_{total}$ for the cavity-fed dipole arrays at distances of a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, and d) 50 mm from the upper surface of the dielectric substrate	98
Figure B.6 – Far-field radiation patterns of a) 10 GHz, b) 30 GHz, c) 60 GHz, and d) 90 GHz cavity-fed dipole arrays	100
Figure B.7 – Main dimensions for the 0.15 mm stainless steel stencil with slot array	101
Figure B.8 – Main dimensions for the pyramidal horn antennas	102
Figure B.9 – 10 GHz patterns of $ E_{total} $ and $Re\{S\}_{total}$ for the pyramidal horn loaded with a slot array at distances of a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, and d) 50 mm from the upper surface of the slot array	105
Figure B.10 – 30 GHz patterns of $ E_{total} $ and $Re\{S\}_{total}$ for the pyramidal horn loaded with a slot array at distances of a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, and d) 50 mm from the upper surface of the slot array	106
Figure B.11 – 60 GHz patterns of $ E_{total} $ and $Re\{S\}_{total}$ for the pyramidal horn loaded with a slot array at distances of a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, and d) 50 mm from the upper surface of the slot array	107
Figure B.12 – 90 GHz patterns of $ E_{total} $ and $Re\{S\}_{total}$ for the pyramidal horn loaded with a slot array at distances of a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, and d) 50 mm from the upper surface of the slot array	108
Figure B.13 – Far-field radiation patterns of a) 10 GHz, b) 30 GHz, c) 60 GHz, and d) 90 GHz pyramidal horn loaded with a slot array	110
Figure D.1 – Schematic view of the assessment of the variation of sPD using square shape by rotating AUT (antenna under test)	121
Figure D.2 – Comparison of $psPD$ averaged using square versus circular shaped areas on planar evaluation surfaces	122
Figure D.3 – Example PD distributions with device next to ear evaluation surface	123
Figure D.4 – Comparison of $psPD$ averaged using cube cross-section (square-like) versus sphere cross-section (circular-like) shaped areas for device next to ear evaluation surface	124

Figure E.1 – Simulation (left) and forward transformation from measurements applying methods described in [29] (right) of power density in the xz -plane (above) and yz -plane (below) at a distance of 2 mm for a cavity-fed dipole array at 30 GHz (see Annex B) 127

Figure H.1 – $psPD_{pwe} / psPD_{tot}$ as function of distance (in units of λ) from cavity-fed dipole array (CDA##G, left-side) and pyramidal horn with slot arrays (SH##G, right-side) operating at 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz, and 90 GHz 137

Table 1 – Evaluation plan check-list 28

Table 2 – Minimum evaluation distance between the DUT antenna and the evaluation surface for which the plane wave equivalent approximation applies 50

Table 3 – Template of measurement uncertainty for power density measurements 70

Table 4 – Example measurement uncertainty budget for power density measurement results 72

Table A.1 – Example of power measurement uncertainty 81

Table A.2 – Communication signals for modulation response test 87

Table B.1 – Target values for pyramidal horn antennas at different frequencies 90

Table B.2 – Main dimensions for the cavity-fed dipole arrays at each frequency of interest 91

Table B.3 – Geometrical parameters of the cavity-fed dipole arrays at each frequency of interest 93

Table B.4 – Substrate and metallic block parameters for the cavity-fed dipole arrays at each frequency of interest 93

Table B.5 – Target values for the cavity-fed dipole arrays at 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz, and 90 GHz 94

Table B.6 – Main dimensions for the stencil with slot array for each frequency 102

Table B.7 – Primary dimensions for the corresponding pyramidal horns at each frequency 103

Table B.8 – Target values for the pyramidal horns loaded with slot arrays at 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz, and 90 GHz 104

Table C.1 – Uncertainty analysis of the probe calibration 119

Table D.1 – Phase shift values for the array antenna 123

Table E.1 – List of analytical reference functions and associated $psPD_{n+}$ target values 131

Table E.2 – List of analytical reference functions and associated $psPD_{tot+}$ target values 132

Table E.3 – List of analytical reference functions and associated $psPD_{mod+}$ target values 132

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ASSESSMENT OF POWER DENSITY OF HUMAN EXPOSURE TO RADIO
FREQUENCY FIELDS FROM WIRELESS DEVICES IN CLOSE PROXIMITY
TO THE HEAD AND BODY (FREQUENCY RANGE OF 6 GHz TO 300 GHz) –****Part 1: Measurement procedure****FOREWORD**

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC document(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation.

IEEE Standards documents are developed within IEEE Societies and Standards Coordinating Committees of the IEEE Standards Association (IEEE SA) Standards Board. IEEE develops its standards through a consensus development process, approved by the American National Standards Institute, which brings together volunteers representing varied viewpoints and interests to achieve the final product. Volunteers are not necessarily members of IEEE and serve without compensation. While IEEE administers the process and establishes rules to promote fairness in the consensus development process, IEEE does not independently evaluate, test, or verify the accuracy of any of the information contained in its standards. Use of IEEE Standards documents is wholly voluntary. *IEEE documents are made available for use subject to important notices and legal disclaimers (see <http://standards.ieee.org/ipr/disclaimers.html> for more information).*

IEC collaborates closely with IEEE in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations. This Dual Logo International Standard was jointly developed by the IEC and IEEE under the terms of that agreement.

- 2) The formal decisions of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees. The formal decisions of IEEE on technical matters, once consensus within IEEE Societies and Standards Coordinating Committees has been reached, is determined by a balanced ballot of materially interested parties who indicate interest in reviewing the proposed standard. Final approval of the IEEE standards document is given by the IEEE Standards Association (IEEE SA) Standards Board.
- 3) IEC/IEEE Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees/IEEE Societies in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC/IEEE Publications is accurate, IEC or IEEE cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications (including IEC/IEEE Publications) transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC/IEEE Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC and IEEE do not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC and IEEE are not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or IEEE or their directors, employees, servants or agents including individual experts and members of technical committees and IEC National Committees, or volunteers of IEEE Societies and the Standards Coordinating Committees of the IEEE Standards Association (IEEE SA) Standards Board, for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC/IEEE Publication or any other IEC or IEEE Publications.
- 8) Attention is drawn to the normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.

- 9) Attention is drawn to the possibility that implementation of this IEC/IEEE Publication may require use of material covered by patent rights. By publication of this standard, no position is taken with respect to the existence or validity of any patent rights in connection therewith. IEC or IEEE shall not be held responsible for identifying Essential Patent Claims for which a license may be required, for conducting inquiries into the legal validity or scope of Patent Claims or determining whether any licensing terms or conditions provided in connection with submission of a Letter of Assurance, if any, or in any licensing agreements are reasonable or non-discriminatory. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any patent rights, and the risk of infringement of such rights, is entirely their own responsibility.

IEC/IEEE 63195-1 was prepared by IEC technical committee 106: Methods for the assessment of electric, magnetic and electromagnetic fields associated with human exposure, in cooperation with the International Committee on Electromagnetic Safety of the IEEE Standards Association, under the IEC/IEEE Dual Logo Agreement between IEC and IEEE. It is an International Standard.

This document is published as an IEC/IEEE Dual Logo standard.

This publication contains supplemental files in the form of analytical reference functions for validation of the reconstruction algorithms in Annex E. Download links for these files can be found in Clause E.5.

The text of this International Standard is based on the following IEC documents:

Draft	Report on voting
106/565/FDIS	106/570/RVD

Full information on the voting for its approval can be found in the report on voting indicated in the above table.

The language used for the development of this International Standard is English.

This document was drafted in accordance with the rules given in the ISO/IEC Directives, Part 2, available at www.iec.ch/members_experts/refdocs. The main document types developed by IEC are described in greater detail at www.iec.ch/standardsdev/publications.

A list of all parts in the IEC/IEEE 63195 series, published under the general title *Assessment of power density of human exposure to radio frequency fields from wireless devices in close proximity to the head and body*, can be found on the IEC website.

The IEC Technical Committee and IEEE Technical Committee have decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under webstore.iec.ch in the data related to the specific document. At this date, the document will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

IMPORTANT – The "colour inside" logo on the cover page of this document indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

INTRODUCTION

This document provides methods to evaluate incident power density exposures due to any electromagnetic field (EMF) transmitting device intended to be used at a position near the human head or body, or mounted on the body, combined with other transmitters within a product, or embedded in garments. The device categories covered include but are not limited to mobile telephones, radio transmitters in personal computers, and desktop and laptop devices. This document also addresses multi-band and multi-antenna devices. The overall applicable frequency range is from 6 GHz to 300 GHz. This document specifies:

- measurement system (Clause 6);
- power density measurement protocols (Clause 7);
- uncertainty evaluation (Clause 8);
- measurement report (Clause 9);
- system checks and system validation (Annex B).

To develop this document, IEC Technical Committee 106 (TC 106) and Technical Committee 34 (TC 34) Subcommittee 1 (SC 1) of IEEE International Committee on Electromagnetic Safety (ICES) formed Joint Working Group 12 (JWG 12) on measurement methods to assess the power density of electromagnetic fields from wireless devices in close proximity to the head and body.

This document is partly based on IEC TR 63170:2018.

NOTE System validation tests are specified in Annex B for 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz, and 90 GHz to cover the frequency range from 6 GHz to 110 GHz. Additional validation antennas to cover the frequency range up to 300 GHz will be developed in a future revision of this document. Further discussion on rationales is given in Annex I.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC/IEEE 63195-1:2022

ASSESSMENT OF POWER DENSITY OF HUMAN EXPOSURE TO RADIO FREQUENCY FIELDS FROM WIRELESS DEVICES IN CLOSE PROXIMITY TO THE HEAD AND BODY (FREQUENCY RANGE OF 6 GHz TO 300 GHz) –

Part 1: Measurement procedure

1 Scope

This document specifies protocols and test procedures for repeatable and reproducible measurements of power density (PD) that provide conservative estimates of exposure incident to a human head or body due to radio-frequency (RF) electromagnetic field (EMF) transmitting communication devices, with a specified measurement uncertainty. These protocols and procedures apply for exposure evaluations of a significant majority of the population during the use of hand-held and body-worn RF transmitting communication devices. The methods apply for devices that can feature single or multiple transmitters or antennas and can be operated with their radiating structure(s) at distances up to 200 mm from a human head or body.

The methods of this document can be used to determine conformity with applicable maximum PD requirements of different types of RF transmitting communication devices being used in close proximity to the head and body, including if combined with other RF transmitting or non-transmitting devices or accessories (e.g. belt-clip), or embedded in garments. The overall applicable frequency range of these protocols and procedures is from 6 GHz to 300 GHz.

The RF transmitting communication device categories covered in this document include but are not limited to mobile telephones, radio transmitters in personal computers, desktop and laptop devices, and multi-band and multi-antenna devices.

NOTE 1 System validation tests are specified in Annex B for 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz, and 90 GHz to cover the frequency range from 6 GHz to 110 GHz. Additional validation antennas to cover the frequency range up to 300 GHz will be developed in a future revision of this document. Further discussion on rationales is given in Annex I.

NOTE 2 The protocols and test procedures in this document can be adapted to evaluate exposure also due to non-communication types of devices operating in close proximity to the head and body, but these devices are not in the scope of this document.

NOTE 3 For the assessment of the combined exposure from simultaneous transmitters operating on frequencies below 6 GHz, the relevant standards for SAR measurements are IEC/IEEE 62209-1528:2020 and IEC/IEEE 62209-3:2019 [1].

NOTE 4 Between 6 GHz and 10 GHz, the scopes of this document and IEC/IEEE 62209-1528:2020 overlap. According to ICNIRP [2] guidelines and IEEE ICES C95.1 [3] standard, power density is the conformity metric in this frequency range. SAR can be used as conformity metric if local regulatory requirements allow it. (e.g. in case where a single transmit band includes test channels at both below and above 6 GHz).

The procedures of this document do not apply for EMF measurements of devices or objects intended to be implanted in the body.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC/IEEE 62209-1528:2020, *Measurement procedure for the assessment of specific absorption rate of human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices – Part 1528: Human models, instrumentation, and procedures (Frequency range of 4 MHz to 10 GHz)*

IEC/IEEE 63195-2:2021¹, *Assessment of power density of human exposure to radio frequency fields from wireless devices in close proximity to the head and body (Frequency range of 6 GHz to 300 GHz) – Part 2: Computational procedure*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

ISO, IEC, and IEEE maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>
- IEEE Dictionary Online: available at <http://dictionary.ieee.org>

3.1 Exposure metrics and parameters

3.1.1

power density

PD

local power density

function of the complex Poynting vector S at the location r that is integrated over a surface to calculate the sPD

Note 1 to entry: Specifications of power density in terms of the integrands of Formula (4), Formula (5), and Formula (8) are provided in 6.7.1. See also rationales provided in Annex I for the PD specifications of 6.7.1.

Note 2 to entry: The formula used to calculate PD can depend on the applicable exposure guidelines or national regulations.

Note 3 to entry: Power density is also referred to as power flux density.

Note 4 to entry: The associated term incident power density refers to quantity of power per unit area that impinges on the body surface. The incident power density just outside the body surface is used to establish local exposure reference levels, which apply at frequencies above 6 GHz in some jurisdictions.

3.1.2

spatial-average power density

sPD

PD (3.1.1) averaged over a surface of area A_{av}

Note 1 to entry: sPD is a function of the location vector r . It is defined on the evaluation surface, except for the edges where no averaging area can be constructed.

Note 2 to entry: Example averaging area sizes specified in exposure limits are 1 cm² and/or 4 cm².

¹ To be published.

3.1.3**peak spatial-average power density***psPD*global maximum value of all *sPD* (3.1.2) values on the evaluation surface (3.2.3)Note 1 to entry: *psPD* is given by Formula (1)

$$psPD = \max_r \{sPD(r)\} \quad (1)$$

where *r* is a point on the evaluation surface.

Note 2 to entry: Other local maxima (i.e. secondary peak spatial-average power density values) can exist (see 3.1.4).

3.1.4**secondary peak spatial-average power density**other local maxima of the spatial-average power density (*sPD*) values that are smaller than the peak spatial-average power density (*psPD*)**3.1.5****Poynting vector***S*vector product of the electric field strength *E* and the magnetic field strength *H* of the electromagnetic field at a given point

Note 1 to entry: The flux of the Poynting vector through a closed surface is equal to the electromagnetic power passing through this surface.

Note 2 to entry: For a periodic electromagnetic field, the time average of the Poynting vector is a vector the direction of which, with certain reservations, can be considered as being the direction of propagation of electromagnetic energy and the magnitude of which can be considered as being the average power flux density.

Note 3 to entry: For a sinusoidal wave of angular frequency ω , the complex Poynting vector is expressed by Formula (2)

$$S = \frac{1}{2} E \times H^* \quad (2)$$

where *E* and *H* are phasors and the asterisk denotes the complex conjugate.Note 4 to entry: The Poynting vector has units of watt per square metre (W/m²).

[SOURCE: IEC 60050-121:2019, 121-11-66 and IEC 60050-705:1995, 705-02-10, modified – The entries have been combined and rearranged; Note 4 has been added.]

3.1.6**plane wave equivalent approximation**

estimation of the power density (PD) under the assumption that the evaluation surface is in the far-field

Note 1 to entry: In accordance with the plane wave equivalent approximation, $PD = 377 \times H^2 = E^2/377$.

Note 2 to entry: This document provides criteria for the validity of the plane wave equivalent approximation using the applied reconstruction algorithm; see 7.4.2.1 and Annex H.

Note 3 to entry: Some documents and national regulations consider the associated term "plane-wave equivalent power density", which for uniform conformity evaluation purposes is applied regardless of whether the evaluation surface is in the far-field. In that case both $377 \times H^2$ and $E^2/377$ must be less than or equal to the applicable power density limit value.

3.1.7**specific absorption rate****SAR**

measure of the rate at which energy is absorbed per unit mass in a human body when exposed to a radio frequency electromagnetic field

Note 1 to entry: The SAR in the tissue-equivalent medium can be determined by the rate of temperature increase or by E-field measurements, according to Formula (3) and Formula (4)

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (3)$$

$$SAR = c_h \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{t=0} \quad (4)$$

where

SAR is the specific absorption rate in watts per kilogram;

E is the RMS value of the electric field strength in the tissue-equivalent medium in volts per metre;

σ is the electrical conductivity of the tissue-equivalent medium in siemens per metre;

ρ is the mass density of the tissue-equivalent medium in kilograms per cubic metre;

c_h is the specific heat capacity of the tissue-equivalent medium in joules per kilogram per kelvin;

$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{t=0}$ is the initial time derivative of temperature in the tissue-equivalent medium in kelvin per second.

Note 2 to entry: A more general definition is that SAR is the time derivative of the incremental energy (dW) absorbed by (dissipated in) an incremental mass (dm) contained in a volume element (dV) of given mass density (ρ), according to Formula (5)

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho dV} \right) \quad (5)$$

Note 3 to entry: SAR is expressed in units of watt per kilogram (W/kg).

3.1.8**exposure ratio**

ratio of exposure metric to the relevant exposure limit at a given operating frequency and location

Note 1 to entry: The exposure ratio can be expressed in percent.

3.1.9**total exposure ratio**

sum of all applicable exposure ratios for simultaneous signal transmission at a given location

3.1.10**conservative exposure****conservative estimate**

<of exposure> estimate of the exposure, including uncertainties as specified in this document, representative of and slightly higher than that expected to occur in the head or body of a significant majority of the human population during intended use of a wireless transmitting device

3.2 Spatial, physical, and geometrical parameters associated with exposure metrics

3.2.1

averaging area

A_{av}

nominal size of the area used for calculating sPD (3.1.2)

Note 1 to entry: On a planar evaluation surface, sPD is calculated as the ratio of power density (3.1.1) integrated over the averaging area A_{av} . On a non-planar evaluation surface, the averaging area indicates the dimensions of the projection of the integration area of the power density on a planar surface.

Note 2 to entry: See details on averaging in 8.4 of IEC/IEEE 63195-2:2021.

3.2.2

measurement region

surface or volume over which the field measurements are performed

Note 1 to entry: If the measurement region and the evaluation surface (see 3.2.3) are different, the data at the evaluation surface will then be derived from data taken at the measurement region by means of reconstruction algorithms.

Note 2 to entry: The dimension, shape and orientation of the measurement region is determined by the test equipment manufacturer based on the measurement methodology and test setup conditions required for evaluating the DUT.

3.2.3

evaluation surface

virtual surface for the evaluation of the spatial-average power density (sPD) emitted by a DUT

Note 1 to entry: Typical evaluation surfaces that can be applied in this document are the inner shell of the SAM phantom with an added pinna, or a planar surface with finite or infinite extension.

Note 2 to entry: The evaluation of the $psPD$ (3.1.3) on the evaluation surface should yield a conservative estimate (3.1.10) of the exposure.

Note 3 to entry: In practice, an evaluation surface can be different from a measurement surface or area.

3.2.4

evaluation distance

distance between the DUT and the evaluation surface

Note 1 to entry: For body-worn device evaluations using a virtual flat phantom, the evaluation distance is from the DUT to the inner surface of the virtual phantom (i.e. the separation distance (3.2.5) plus the 2 mm shell thickness of a virtual phantom).

3.2.5

separation distance

distance between the DUT and the outer surface of a virtual phantom

3.2.6

pinna

auricle

cartilaginous projecting portion of the outer ear, consisting of the helix, lobule, and anti-helix

Note 1 to entry: The SAM phantom includes a representative pinna feature.

3.2.7

field impedance

wave impedance

ratio of the magnitude of the electric field (E-field) vector to the magnitude of the magnetic field (H-field) vector at a point in space

Note 1 to entry: In the far-field in air, the field impedance is equal to the characteristic impedance of free space, η_0 . In the reactive near-field, the field impedance can be significantly different from the characteristic impedance of free space and it can vary strongly with location.

3.2.8

near-field

region encompassed by the reactive near-field and the radiative near-field

Note 1 to entry: See also 3.2.10 and 3.2.9 for definitions of reactive near-field and radiative near-field, respectively.

3.2.9

radiative near-field

region of space between the reactive near-field and the far-field, wherein the predominant components of the electromagnetic field are those that represent a propagation of energy, and wherein the angular field distribution is dependent upon the distance from the antenna

Note 1 to entry: In the radiative near-field, the out-of-phase (i.e. evanescent) component of the electromagnetic field decays, and the in-phase (i.e. propagating) component of the electromagnetic field emerges.

[SOURCE: IEC 60050-712:1992, 712-02-04, modified – In the term, "radiating" has been replaced by "radiative". In the definition, "region" has been deleted after "near-field" and "far-field". The note has been replaced by a new note to entry.]

3.2.10

reactive near-field

region of space immediately surrounding an antenna, where the predominant components of the electric field and magnetic field are those that represent an exchange of reactive energy between the antenna and the surrounding medium, and where the electric field and magnetic field components are 90° out of phase

[SOURCE: IEC 60050-712:1992, 712-02-01, modified – In the definition, the electric field and magnetic field component phase difference has been added.]

3.2.11

far-field

region of the electromagnetic field of an antenna wherein the predominant components of the field are those that represent a propagation of energy, the angular field distribution is essentially independent of the distance from the antenna geometrical centre, and the ratio of predominant electric field and magnetic field components is constant and is equal to the wave impedance of 377 Ω

Note 1 to entry: For the purposes of this document, the boundary of the near-field and far-field is as specified in 7.4.2.1.

[SOURCE: IEC 60050-712:1992, 712-02-02, modified – In the definition, the distance to antenna geometrical centre has been clarified, and a phrase on the ratio of the electric field and magnetic field components has been added. The notes have been replaced by a new note to entry.]

3.3 Measurement instrumentation, field probe, and data-processing parameters

3.3.1

power density measurement

assessment of power density (PD) (3.1.1) by the use of a measurement apparatus and possibly the use of reconstruction

3.3.2

reconstruction

use of algorithms to transform the measured fields to the power density at the evaluation surface

Note 1 to entry: Reconstruction algorithms include one or more of the following techniques:

- methodologies to retrieve field components and power densities (i.e. determined using field reconstruction) from the measured data (e.g. to retrieve the phase from the amplitude, or the H-field from the E-field (or vice versa).
- forward transformation and backward transformation to evaluate the field on other surfaces than the surfaces of measurements.

3.3.3

backward transformation

transformation of measured fields toward the source (i.e. against the direction of propagation)

3.3.4

forward transformation

transformation of measured fields away from the source (i.e. in the direction of propagation)

3.3.5

field probe probe

device capable of measuring the electric field, the magnetic field, or both

Note 1 to entry: A field probe consists of one or more probe sensors and a conductive or non-conductive transmission line (e.g. fibre optic) that sends the measured signal to the readout electronics.

Note 2 to entry: A field probe can include a physical housing and electronics components.

3.3.6

probe sensor

element (e.g. small dipole or small loop antenna) that receives an electric field, a magnetic field, or power density at a point in space

Note 1 to entry: One or more probe sensors are contained in a field probe.

3.3.7

scanning system

mechanical, electro-mechanical, or electronic system, or a combination of those, capable of placing the field probe or multiple field-probe at specified positions with known accuracy

3.3.8

multiple field-probe

<system> device comprised of a number of field probes, arranged, oriented and excited to obtain a prescribed electric field, magnetic field or both simultaneously

Note 1 to entry: The multiple field-probes in a system are usually identical and congruent by translation or by rotation about an axis; moreover, in general they are regularly spaced with conductive or non-conductive transmission lines that send the measured signal(s) to the readout electronics.

3.3.9

phasor

complex number expressing the magnitude and phase of a time-varying quantity

Note 1 to entry: Unless otherwise specified, phasor notation is used only within the context of steady state alternating linear systems.

Note 2 to entry: In polar coordinates, a phasor can be written as $Ae^{j\theta}$, where A is the amplitude or magnitude, and θ is the phase angle.

3.3.10**phasor probe**

probe along with readout electronics that enables the measurement of the phasor of a magnetic field vector or an electric field vector

3.3.11**axial isotropy**

maximum deviation of the PD measured when rotating through 360° the source or the probe tip around its major axis, with the propagation vector (k -vector) of the incident plane wave parallel to the probe axis

3.3.12**hemispherical isotropy****probe isotropy**

ratio of the highest to lowest indication from the probe exposed to a constant field strength when the probe orientation is varied through the range of relevant angles that cover the incidence angles that are potentially spanned during DUT testing

Note 1 to entry: For some probe technologies, multiple measurements with different probe orientations followed by an evaluation are required in order to determine the field vector orientation (e.g. see Pfeifer et al. [4]); hemispherical isotropy can be derived from those results.

3.3.13**cross coupling**

signal reading at one sensor port that is due to measurement at another sensor within a field probe

Note 1 to entry: Cross coupling is a result of imperfect isolation of the signals. Cross coupling can occur along the transmission lines from the sensor or in the data acquisition electronics.

3.3.14**linearity error**

maximum deviation of a measured quantity from the expected values specified by a reference line over the measurement range

3.3.15**measurement drift**

continuous or incremental change in measured quantity over time, due to changes in metrological properties of a measuring instrument

Note 1 to entry: This is separate from DUT drift addressed in 7.4.4.

3.3.16**readout electronics**

measurement system component that connects to the electric field or magnetic field probe and provides a conversion of the measured values to the post processor of the measurement system

3.3.17**response time**

time required by the measuring equipment to reach 90 % of its final value after a step variation of the input signal

3.3.18**sensitivity of a measurement system**

ratio of the magnitude of the system response (e.g. voltage) to the magnitude of the quantity being measured (e.g. electric field strength squared)

3.3.19

signal-to-noise ratio

relative magnitude of the desired signal with respect to the total of all undesired signals in a measurement

Note 1 to entry: The signal-to-noise-ratio is often expressed in decibel (dB).

3.3.20

device holder

fixture constructed of low-loss dielectric material that is used to hold the DUT in the required test position during PD measurement

3.3.21

scattering

deflection of electromagnetic fields, causing a change in the local field distribution and the direction of propagation

Note 1 to entry: Scattering can be caused by the measurement equipment or surrounding environment.

3.3.22

validation

verification (3.3.24) where the specified requirements are adequate for an intended use

[SOURCE: ISO/IEC 17025:2017, 3.9 [5]]

3.3.23

system validation

validation (3.3.22) that the accuracy of the measurement system is adequate for use in accordance with the requirements of this document, including validating that the measurement system operates within the stated measurement uncertainty

Note 1 to entry: Although users of systems can perform system validations, generally it is a complex, specialized, and extensive process, and therefore in some cases is performed by the system manufacturer.

3.3.24

verification

provision of objective evidence that a given item fulfils specified requirements

[SOURCE: ISO/IEC 17025:2017, 3.8 [5]]

3.3.25

relative system check

verification (3.3.24) of the repeatability of the measurement system using a source with a reference value before performing conformity testing

3.3.26

absolute system check

verification (3.3.24) of the absolute accuracy of a measurement system using a source with a traceable absolute target value

Note 1 to entry: Absolute system checks are performed at the user's site.

Note 2 to entry: One purpose of the absolute system check is to verify that the shipment and installation at the user site did not affect the performance of the measurement system.

3.4 RF power parameters

3.4.1

output power

power at the output of the RF transmitter when the antenna, or a load with the same input impedance as the antenna, is connected to it

3.4.2**conducted power**

power delivered by the power amplifier of the device to 50 Ω matched load

3.4.3**accepted power****net power**

power delivered to an antenna

Note 1 to entry: The accepted power, P_{acc} , is lower than the forward power, P_f (measured into a 50 Ω load), due to antenna mismatch according to $P_{acc}/P_f = (1 - |S_{11}|^2)$, where S_{11} is the reflection coefficient of the antenna.

3.4.4**equivalent isotropically radiated power****EIRP**

product of the power supplied by a radio transmitter to an antenna and the absolute gain of the antenna in a given direction

Note 1 to entry: Although not indicated in IEC or ITU definitions, some literature synonymously uses the term effective isotropic radiated power.

[SOURCE: IEC 60050-712:2021, 712-02-51]

3.4.5**total radiated power****TRP**

integral of the equivalent isotropically radiated power (EIRP) of an antenna in all directions in the far-field

Note 1 to entry: TRP is given by Formula (6), where ϕ and θ are angles of azimuth and elevation, respectively, in a spherical coordinate system.

$$TRP = \frac{1}{4\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} EIRP(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (6)$$

Note 2 to entry: If the antenna were enclosed in a perfectly absorbing sphere, the TRP would be the power that would be absorbed by that sphere.

Note 3 to entry: TRP is related to the accepted power, P_{acc} , and the radiation efficiency, η_{eff} , by the formula $TRP = \eta_{eff} \times P_{acc}$.

3.5 Test device technical operating and antenna parameters**3.5.1****operating mode**

wireless protocol or standard used by a device to communicate with another terminal or host network

3.5.2**channel****RF channel****frequency channel**

part of the frequency spectrum intended to be used for the transmission of signals and which may be defined by two specified limits, or by its centre frequency and the associated bandwidth, or by any equivalent indication

Note 1 to entry: The number of RF channels and the corresponding channel bandwidth can vary among individual wireless technologies, and are subject to national frequency allocations. For the purpose of this document, PD measurements are performed at specific channels; for example, the high, middle, and low channels of the transmission band.

[SOURCE: IEC 60050-701:1988, 701-02-05]

3.5.3**frequency band**

transmitting frequency range associated with a specific wireless communication operating mode

Note 1 to entry: Transmitting frequency range depends on (national) spectrum allocations.

Note 2 to entry: Operating mode is also known as "radio access technology (RAT)."

3.5.4**antenna sub-array**

subset of radiating elements in an array that operate collectively

Note 1 to entry: Antenna elements can be used separately by two or more sub-arrays.

3.5.5**array****array antenna****antenna array**

antenna comprised of a number of generally identical radiating elements, arranged, oriented and excited to obtain a prescribed radiation pattern

Note 1 to entry: The IEV also includes phased array antenna (IEV 712-03-20): an array antenna whose beam direction or radiation pattern is controlled primarily by the relative phase of excitation of the different radiating elements of the array.

[SOURCE: IEC 60050-712:1992, 712-01-05]

3.5.6**codebook**

description of all applicable element-feed amplitude and phase combinations supported by antenna array or antenna sub-array in a DUT

Note 1 to entry: IEC/IEEE 63195-2:2021 defines codebook as set of all possible excitation vectors. The excitation vectors correspond to all applicable element-feed amplitude and phase combinations.

3.5.7**correlated signals**

signals yielding non-zero time-domain correlation integral at some time instant

Note 1 to entry: Details on this definition are described in IEC TR 62630:2010 [6].

3.5.8**proximity sensor**

internal sensor or combination of sensors of the DUT utilized for the detection of the user proximity for the purpose of limiting transmitter power to facilitate conformity with RF exposure limits

3.5.9

radiation efficiency

ratio of the total radiated power (TRP) (3.4.5) of an antenna to the accepted power (3.4.3) to the antenna

Note 1 to entry: TRP is related to the accepted power, P_{acc} , and the radiation efficiency, η_{eff} , by the formula

$$TRP = \eta_{\text{eff}} \times P_{\text{acc}}.$$

3.5.10

time averaging

temporal integration of the measured signal normalized to the integration period

3.6 Test device physical configurations

3.6.1

device under test

DUT

test device

device that is tested according to the procedures described in this document to determine the PD level

Note 1 to entry: A DUT may be further categorized as a body-worn, body-supported, desktop, front-of-face, hand-held, limb-worn, clothing-integrated, or generic device.

3.6.2

multi-band

<wireless communication device> capable of operating in more than one frequency band

3.6.3

generic device

device that does not belong to any of the specific device categories

Note 1 to entry: Specific device categories are defined in 3.6.5, 3.6.6, 3.6.7, 3.6.8, 3.6.9, 3.6.10, and 3.6.11.

3.6.4

intended use

use for which a device is intended, for the full range of available functions, according to the specifications, instructions and information provided by the DUT manufacturer in the user documentation

Note 1 to entry: According to CENELEC [7], [8], conformity evaluations for Europe take into account all intended operating conditions and the reasonably foreseeable conditions of use.

3.6.5

body-worn device

device containing one or more wireless transmitters or transceivers that is positioned in close proximity to a person's torso or limbs (excluding the head) by means of a carrying accessory during its intended use or operation of its radio functions

3.6.6

body-supported device

device containing one or more wireless transmitters or transceivers whose intended use includes transmitting with any portion of the device being placed against a user's body

3.6.7

desktop device

device placed or mounted on a desk, table, or similar supporting structure, with antennas intended to be operated at or closer than 200 mm from the human body

3.6.8

front-of-face device

hand-held device containing one or more wireless transmitters or transceivers operated in close proximity (within 200 mm) to the face

3.6.9

hand-held device

portable device which is operated in a user's hand at a distance of over 200 mm from the head or torso during its intended use

3.6.10

laptop device

device, containing one or more wireless transmitters or transceivers, that can sit on the user's lap and is not intended for hand-held use

Note 1 to entry: Laptop device types include laptop (notebook) computers, typically comprised of separate keyboard and display sections connected through a hinge, and tablet computers that typically have a single-section construction where the display section also serves as input interface using a stylus or virtual keyboard.

3.6.11

limb-mounted device

device containing one or more wireless transmitters or transceivers whose intended use includes being strapped onto the arm or leg of the user while transmitting

Note 1 to entry: Limb-mounted device types include wrist-mounted, ankle-mounted, and forearm-mounted devices.

3.6.12

accessory

device supplementing a main device or apparatus, but not forming part of it, that is needed for its operation or to confer on it specific characteristics

EXAMPLE 1 Accessories for holding, affixing, or otherwise carrying, wearing, or attaching the device, as well as providing spacing from the body (e.g. a belt-clip, wrist-strap or any other body strap, or lanyard for wearing the device using a necklace).

EXAMPLE 2 Electronic accessories for performing specialized tasks or which provide additional features (e.g. Global Positioning System (GPS) modules, outboard printers, MPEG-1 Audio Layer 3 (MP3) players, cameras or viewing devices).

EXAMPLE 3 Electronic accessories providing audio or video input or output (e.g. headsets, microphones, cameras).

EXAMPLE 4 Accessories providing enhanced RF capability to the device (e.g. original, replacement, or auxiliary antennas).

EXAMPLE 5 Batteries and related direct current (DC) power components.

EXAMPLE 6 Combinations of accessories, where two or more of the items of the preceding examples are combined within one component (e.g. belt clip with built-in short-range wireless communications technology and "pigtail" audio cable to device).

[SOURCE: IEC 60050-151:2001, 151-11-24]

3.7 Uncertainty parameters

3.7.1

uncertainty

confidence range of the assessed value

3.7.2

standard uncertainty

estimated standard deviation of a measurement or simulation result, equal to the positive square root of the estimated variance

3.7.3**combined uncertainty**

estimated standard deviation of the measurement or simulation result obtained by combining the individual standard uncertainties of both Type A and Type B evaluations using the "root-sum-square" method of combining standard deviations that are obtained by taking the positive square root of the estimated variances

3.7.4**expanded uncertainty**

quantity defining an interval about the result of a measurement or simulation that is expected to encompass a distribution of values within a specified confidence interval that can reasonably be attributed to the measurand

3.7.5**uncertainty evaluation**

evaluation of uncertainty by the statistical analysis of series of observations (Type A) or by other means (Type B)

4 Symbols and abbreviated terms**4.1 Symbols****4.1.1 Physical quantities**

The internationally accepted SI units are used throughout the document.

Symbol	Quantity	Unit	Dimensions
α	attenuation coefficient	reciprocal metre	1/m
P	power	watt	W
J	current density	ampere per square metre	A/m ²
σ	electric conductivity	siemens per metre	S/m
E	electric field strength	volt per metre	V/m
f	frequency	hertz	Hz
PD	power density	watt per square metre	W/m ²
S	Poynting vector	watt per square metre	W/m ²
H	magnetic field strength	ampere per metre	A/m
ρ	mass density	kilogram per cubic metre	kg/m ³
δ	penetration depth	metre	m
μ	permeability	henry per metre	H/m
sPD	spatial-average power density	watt per square metre	W/m ²
sPD_{n+}	surface-normal propagation-direction spatial-average power density	watt per square metre	W/m ²
sPD_{tot+}	total propagating spatial-average power density	watt per square metre	W/m ²
sPD_{mod+}	total spatial-average power density considering reactive near-field effects	watt per square metre	W/m ²
$psPD$	peak spatial-average power density	watt per square metre	W/m ²
$psPD_{n+}$	surface-normal propagation-direction peak spatial-average power density	watt per square metre	W/m ²
$psPD_{tot+}$	total propagating peak spatial-average power density	watt per square metre	W/m ²

Symbol	Quantity	Unit	Dimensions
$psPD_{mod+}$	total peak spatial-average power density considering reactive near-field effects	watt per square metre	W/m^2
c_h	specific heat capacity	joule per kilogram per kelvin	$J/(kg\ K)$
ε	permittivity	farad per metre	F/m
SAR	specific absorption rate	watt per kilogram	W/kg
T	temperature	kelvin	K
λ	wavelength	metre	m

NOTE In this document, temperature is quantified in degrees Celsius, as defined by: $T(^{\circ}C) = T(K) - 273,15$.

4.1.2 Constants

Symbol	Physical constant	Magnitude
c	speed of light in vacuum	$2,998 \times 10^8\ m/s$
η_0	characteristic impedance of free space	$376,73\ \Omega$
ε_0	permittivity of free space	$8,854 \times 10^{-12}\ F/m$
μ_0	permeability of free space	$4\pi \times 10^{-8}\ H/m$

4.2 Abbreviated terms

2D	two-dimensional
3D	three-dimensional
B-M	back-to-mouth
CAD	computer aided design
CP	cyclic prefix
CW	continuous wave
DFT-s	discrete Fourier transform spread
DUT	device under test
E-field	electric field
EIRP	equivalent isotropically radiated power
EMC	electromagnetic compatibility
ER	exposure ratio
ERP	ear reference point
FDTD	finite-difference time-domain
GTEM	gigahertz transverse electromagnetic
H-field	magnetic field
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
MIMO	multiple input multiple output
N-F	neck-to-front
NR	new radio
OFDM	orthogonal frequency-division multiplexing
PAPR	peak to average power ratio
PD	power density
QAM	quadrature amplitude modulation
QPSK	quadrature phase shift keying

RB	resource block
RF	radio frequency
RMS	root mean square
RSS	root sum square
SAM	specific anthropomorphic mannequin
SAR	specific absorption rate
TER	total exposure ratio
TRP	total radiated power
VNA	vector network analyser

5 Quick start guide and application of this document

5.1 Quick start guide

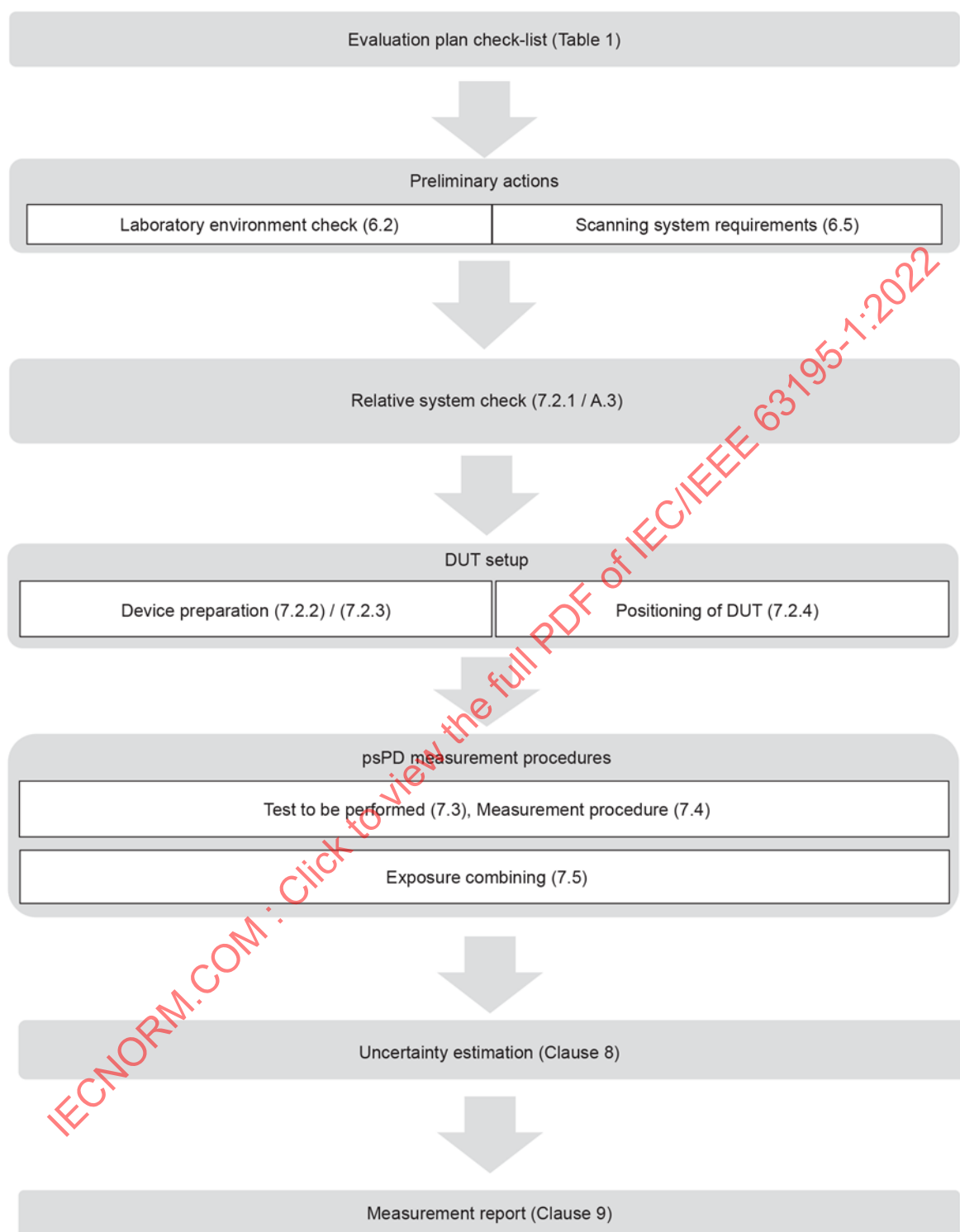
The quick start guide shown in Figure 1 and the evaluation plan check-list shown in Table 1 provide a high-level overview of the PD measurement procedure. For the details of each step, refer to the relevant clause specified in Figure 1 and Table 1.

NOTE In the far-field of a source at separation distances less than 200 mm, a simpler measurement system and test procedures can be used, such as described in IEC 62311:2019 [9]².

² Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

Table 1 – Evaluation plan check-list

Stage	Evaluation steps	Action
Evaluation plan check-list Planning of the measurement configurations	– What type of device is being evaluated? – Review of antennas, possible beam-steering options and supported wireless technologies, single antenna or require combinations of exposure from multiple antennas. – What are the applicable evaluation surfaces? – Working under laboratory conditions and following good laboratory practice and documentation, prepare to conduct the necessary evaluation.	Complete evaluation plan check-list.
Preliminary actions and Relative system check	– An environmental measurement shall be performed, and the data recorded (6.2). – Relative system check shall be performed to verify that the system components are working correctly (Clause A.3).	Shall be performed before starting a project and repeated in accordance with 7.2.1.
DUT setup Preparation of DUT	The protocol for <i>psPD</i> assessment identifies the applicable configurations that shall be tested. The essential steps include: – preparing the DUT by establishing a connection to a network simulator; – configuring the DUT to operate on the appropriate test frequencies, wireless modes, and exposure conditions; – configuring the DUT to operate on the appropriate beam-steering options; – positioning the DUT in relation to the measurement region.	Ensure the DUT is configured in the correct way and radiating appropriately for the test case, and positioned correctly in relation to the measurement region.
PD measurement procedures General <i>psPD</i> procedure	– This stage is the actual procedure for the measurement of <i>psPD</i>. – The procedure is iterative to ensure that the highest value of the <i>psPD</i> of a DUT is captured. – This is done by a systematic process looking at all device positions, configurations, and operating modes in all frequency bands accordingly (7.2.3).	Determining highest <i>psPD</i>. Ensure the rationale for test reduction is recorded and reported if used.
Uncertainty evaluation	– Requirements and approximation formulas are provided (Clause 8), enabling the estimation of each individual uncertainty component. – The uncertainty budget shall cover the appropriate frequency range with regards to equipment used in the <i>psPD</i> system.	Determine uncertainty and complete the uncertainty table.
Reporting <i>psPD</i> results	– The final report describes the results of the evaluations, provides sufficient technical details to allow for repeatability of the evaluations performed, and reports the results by comparison with the relevant limit (Clause 9). The measurement report shall contain sufficient details and information for demonstrating conformity to the requirements of this document.	Prepare the final measurement report along with addressing the requirements listed in Clause 9.



IEC

Figure 1 – Quick Start Guide

5.2 Application of this document

This document and IEC/IEEE 63195-2:2021 were developed in parallel in two joint working groups of IEC and IEEE to prepare procedures for conformity evaluation to exposure limits on the incident power density under particular consideration of the exposure from wireless devices of the new fifth generation (5G) mobile technology operating in a frequency range from 6 GHz to 300 GHz. This document specifies measurement procedures, and IEC/IEEE 63195-2:2021 specifies computational procedures.

After the fundamental work on the measurement procedures for conformity evaluation at frequencies above 10 GHz had been documented in IEC TR 63170:2018 [10], both this document and IEC/IEEE 63195-2:2021 were developed in a comparatively short time period of two years. In parallel, the ICNIRP [2] and TC95 of the IEEE ICES revised their exposure guidelines and included new basic restrictions and reference levels for the frequency range of 6 GHz and above. These are based on the absorbed/epithelial power density or incident power density, respectively, averaged over a square area of 1 cm² or 4 cm².

This document contains all relevant specifications for the application of measurement procedures for conformity evaluation. While parts of it can be applied independently from the computational standard IEC/IEEE 63195-2:2021, it refers to the post processing methods for power density averaging and maximization of the incident power density that are common to both this document and IEC/IEEE 63195-2, but are specified only in IEC/IEEE 63195-2:2021. Likewise, computational conformity evaluation is described in IEC/IEEE 63195-2:2021. For validations of numerical modelling results by measurements, the methods of this document are required.

5.3 Stipulations

Due to the constraints on the time available for the development of this document and IEC/IEEE 63195-2:2021, practical options needed to be found regarding the interpretation of the new exposure guidelines for the assessment of the conformity with the new limits. These concern the construction of the averaging area and the calculation of the spatial average power density on this averaging area. Regarding the calculation of the spatial average power density, different methods are specified with the objectives to warrant compatibility with exposure evaluations obtained according to IEC TR 63170:2018 [10] and to consider exposure conditions other than perpendicular incidence in the far-field. Annex I discusses the options and their rationales.

These options do not impair the applicability of the methods specified in IEC/IEEE 63195-2 and this document for the conformity evaluation with the reference levels specified in the exposure guidelines.

6 Measurement system and laboratory requirements

6.1 General requirements

A PD measurement system is used to determine the peak spatial-average power density ($psPD$) on the evaluation surface in accordance with the methods described in Clause 7. The measurement protocol in this document is based on mechanically positioning field probes in a grid relative to the DUT to scan the electric field or magnetic field distributions, or both. The following are minimum requirements of the measurement system.

- a) Measurements shall be performed in a controlled laboratory (see 6.2).
- b) The measurement system shall consist of the field probe(s) (see 6.3), measurement instrumentation (see 6.4), a scanning system (see 6.5), a DUT holder (see 6.6) and post-processing software (see 6.7). The post-processing software may include field reconstruction algorithms.
- c) The measurement system shall be capable of determining the sPD on the required evaluation surface.

- d) Uncertainties of the measured field components and power density results (i.e. determined using field reconstruction) shall be assessed and provided (see Clause 8).
- e) The measurement system shall determine the *sPD* on the evaluation surface using the measured field components and power densities (i.e. determined using field reconstruction), of which the *psPD* shall be calculated. The uncertainty of the *psPD* calculation shall be provided based on the uncertainty of the measured field components and power densities (i.e. determined using field reconstruction) (see Clause 8).
- f) The dynamic range of the *sPD* for which the uncertainty budget is valid shall be from at most 20 % to at least 200 % (less than –7 dB to more than +3 dB) of the applicable exposure limit.
- g) The noise floor of the measurement system shall be at least 10 dB below the lower end of the dynamic range of the PD, so that the influence of noise on the measurement uncertainty is small.
- h) The maximum expanded uncertainty ($k = 2$) of the *psPD* assessment shall not be larger than ± 2 dB (–37 % to +58 %) over the dynamic range.
- i) The bandwidth of the measurement system shall be valid for the wireless communication signals and systems tested.
- j) The measurement system shall have valid calibration across the frequency range tested.
- k) The manufacturer of the measurement system shall report to the user the limitations of the system relative to this document. This includes the frequency range, the bandwidth, the locations of the evaluation surface relative to the DUT, the dynamic range, and the measurement uncertainty.
- l) The components of the measurement system that directly affect the measurement accuracy (e.g. field probes, measurement instrumentation) shall have calibration traceable to international standards.
- m) The measurement system shall be validated as a complete and calibrated system (see Clause A.5). System validation is required whenever modifications have been made to the system (e.g. software version, or different type or version of measurement components).
- n) Where this document explicitly specifies performance characteristics for the measurement system or a part of the measurement system, the manufacturer of the system or its parts, or the system integrator, shall document conformity with the provisions of this document.

Conformity with the preceding general requirements shall be documented by the system manufacturer or system integrator.

NOTE 1 Simplified measurement systems and test procedures can be applied if the body is always in the far-field of the source (e.g. see IEC 62311:2019 [9]), which can also include separation distances closer than 200 mm.

NOTE 2 The ICNIRP RF EMF Guidelines [2] state that reference levels (incident power density) cannot be used to determine conformity within reactive near-field, basic restrictions (absorbed power density) should be used instead. Based on the ICNIRP definition of reactive near-field, this limitation is applicable to procedures of this document at frequencies below 24 GHz. IEC TC 106 and IEEE ICES are considering to develop an international standard for absorbed or epithelial power density in future.

NOTE 3 System validation methods are currently specified in this document for the frequency range 6 GHz to 100 GHz, which covers all devices currently available. Extension to 300 GHz of the validation procedures will be specified in a future revision.

NOTE 4 To quantify the measurement reproducibility of a system, interlaboratory comparisons (Annex F) using sources that are representative of the radiating characteristics of tested devices can be conducted.

6.2 Laboratory requirements

The tests shall be performed in a laboratory conforming to the following requirements.

- a) The ambient noise for any measurement shall correspond to less than –20 dB (1 %) of either the applicable power density limit or the peak measured field, whichever is higher.

- b) The influence of reflections from objects in the laboratory (including the scanning measurement system, cables, walls, and the DUT holder) on the measurements shall be less than -17 dB (2 %) of the applicable power density limit. See 8.5.9 to determine the influence of reflections. This shall be evaluated at least annually.
- c) The ambient temperature shall be in the range for which the calibration of the system component is valid and the transmission variation of the DUT by temperature due to ambient temperature is less than 5 % (e.g. between 18 °C and 25 °C) (see 8.5.8). It shall also vary by less than ± 2 °C with respect to the ambient temperature during the measurement.
- d) The measurement equipment shall have been powered on and allowed to warm up in the laboratory in accordance with manufacturer's stabilization time.

Conformity with these laboratory requirements shall be documented in the measurement report.

6.3 Field probe requirements

The measurement system includes one or more field probes; multiple field-probe systems can significantly reduce the measurement time. Each field probe shall conform to the following requirements.

- a) The field probe(s) shall measure the electric field or the magnetic field or both.
- b) The cross-coupling level between field components shall be such that the maximum expanded uncertainty requirements in 6.1 are met.
- c) The field probe shall measure the phase of the field unless the evaluation surface is in the far-field (see Table 2 of 7.4.2.1) or unless field reconstruction techniques are applied to estimate the power density correctly.
- d) The field probe dynamic range shall be such that the system dynamic range requirements in 6.1 are met.
- e) The field probe size and construction shall ensure that the effect of scattering from the probe on the fields transmitted by the DUT is within the expanded uncertainty for probe scattering as described in 8.4.7.
- f) The field probe shall be calibrated according to the requirements in Annex C. The probe may be calibrated separately from the rest of the measurement system if the same electrical interface characteristics are used during calibration as during measurements. It is preferable not to calibrate the probe separately from the rest of the measurement system. If the probe is calibrated separately, the calibration uncertainty should include statistical interdependence with a signal reading instrument.
- g) The field probe calibration report shall document at least the uncertainties and the associated validity restrictions of mechanical offset (8.4.10), frequency response (8.4.3), sensitivity, linearity error (8.4.6), isotropy (8.4.5), cross coupling (8.4.4), and field impedance dependence (8.4.12). Any dependence of these quantities on frequency and bandwidth shall also be reported.

Conformity with these field probe requirements shall be documented by the manufacturer of the measurement system.

6.4 Measurement instrumentation requirements

The field probe output is processed by the measurement instrumentation, which conforms to the following requirements.

- a) The measurement instrumentation shall receive the signal measured by the field probe and provide it to a computer for evaluation.

NOTE The computer can be integrated with the measurement instrumentation, separate from it, or both.

- b) The measurement instrumentation shall be calibrated. It may be calibrated separately from the probe if the same input and electrical interface characteristics are used during calibration as during measurements.

The measurement instrumentation may perform amplification, frequency filtering or other signal processing. It may also account for signal compression, amplifier non-linearities and other non-linear effects.

Conformity with these measurement instrumentation requirements shall be documented by the manufacturer of the measurement system.

6.5 Scanning system requirements

6.5.1 Single-probe systems

The scanning system positions the field probe on the measurement region. The requirements of the scanning system are as follows.

- a) The scanning method shall be reported, including whether it performs two-dimensional (2D) or three-dimensional (3D) scans.
- b) The algorithm for determining the measurement grid, if a fixed grid is not used, shall be reported.
- c) The scanning system shall restrict the field probe locations during measurement to the region where the influence of the field impedance on the measurement is within the stated uncertainty (see 8.4.12). This uncertainty shall not be greater than 0,5 dB.
- d) The scanning system shall be capable of positioning the field probe over a large enough measurement region such that the $psPD$ can be determined at any point on the evaluation surface so to meet the stated REC uncertainty (see 8.4.18).
- e) The accuracy and repeatability of the field probe positioning shall be reported, and they shall be sufficient to ensure that the measurement uncertainty of the $psPD$ is within the stated PPO uncertainty (see 8.4.8). The tolerance of field probe positioning shall also be sufficient to combine exposures from multiple antennas or multiple transmitters (see 7.5).
- f) The scanning system shall be capable of rotating the field probe, if necessary, to capture the required field components and power densities (i.e. determined using field reconstruction). The accuracy and repeatability of field probe orientation shall be reported.
- g) The scanning resolution shall be sufficient to maintain the measurement uncertainty of the $psPD$ within the stated uncertainty.
- h) At each field probe location, the scanning system shall be capable of keeping the field probe in place for a sufficiently long time with respect to the integration time, as determined according to 8.5.3.

NOTE Scanning over the measurement region can include a combination of fast scans and full scans to reduce the measurement time, as long as this does not increase the measurement uncertainty. See 7.4.1 for more information.

Conformity with these scanning system requirements shall be documented by the manufacturer of the measurement system.

6.5.2 Multiple field-probe systems

The scanning system with multiple field-probes is in general regularly spaced configuration that manages the relative positioning of the field probes with respect to the DUT, such that the measurement region is covered. The requirements of the scanning system are as follows.

- a) The scanning method shall be documented, including whether it performs 2D or 3D scans.
- b) The algorithm for determining the measurement grid, if it does not measure a fixed grid, shall be documented.
- c) The uncertainty of the relative position of the field probes with respect to the DUT shall be within the uncertainty for probe positioning offset (PPO ; see 8.4.8).
- d) The scanning system shall be capable of covering a large enough measurement region such that the $psPD$ can be determined at any point on the evaluation surface.

- e) The accuracy and repeatability of the positioning shall be reported, and they shall be sufficient to ensure that the measurement uncertainty of the $psPD$ is within the stated uncertainty. The tolerance of field probe positioning shall also be sufficient to combine exposures from multiple antennas or multiple transmitters (see 7.5).
- f) The scanning system shall be capable of rotating the field probes and/or the DUT, if necessary, to capture the required field components and power densities (i.e. determined using field reconstruction). The accuracy and repeatability of field probes and/or DUT orientation shall be reported.
- g) Minimal separation distance that ensures sufficiently low uncertainty contribution from the probe mutual coupling, such that the maximum expanded uncertainty requirement in 6.1 is met, shall be specified by the system manufacturer.
- h) The scanning resolution shall be sufficient to maintain the measurement uncertainty of the $psPD$ within the stated tolerance.
- i) For each acquisition, the scanning system shall be capable of keeping the field probes or the DUT or both in place for a sufficiently long time with respect to the integration time, as determined according to 8.5.3.

NOTE 1 Scanning over the measurement region can include a combination of fast scans and full scans to reduce the measurement time, as long as this does not increase the measurement uncertainty. See 7.4.1 for more information.

NOTE 2 The scanning system can be employed with combination of a DUT positioning system to reduce the measurement uncertainties such as the phase and amplitude variations due to cable bending.

Conformity with these scanning system requirements shall be documented by the manufacturer of the measurement system.

6.6 Device holder requirements

The device holder maintains the DUT in position during the measurement. The requirements of the device holder are as follows.

- a) The positions and orientations shall enable the measurement of the DUT in all required measurement regions.
- b) The device holder shall enable known and repeatable positioning and orientation of the DUT.
- c) The device holder, including its supporting structure, shall be designed to minimize the perturbation of the fields from the DUT. The parts of the device holder that are in direct contact with the DUT shall be made of materials having a loss tangent $\leq 0,05$ and relative permittivity $\leq 1,2$.
This requirement can be suppressed when the device holder is in direct contact with the DUT sufficiently far away from the radiating antenna. Rationale for use of such materials shall be documented in test report.
- d) The reflections due to the device holder structure shall be less than -20 dB at the location of the DUT.
- e) The device holder uncertainty shall be determined according to 8.5.5.

Conformity with these device holder requirements shall be documented by the manufacturer of the measurement system.

6.7 Post-processing quantities, procedures, and requirements

6.7.1 Formulas for calculation of sPD

6.7.1.1 General

The sPD is evaluated at the location r as a function of the complex Poynting vector S . Depending on the dominant direction of incidence and polarization of the electromagnetic field, or with exposure in the near-field of a DUT, 6.7.1.2, 6.7.1.3, and 6.7.1.4 specify the formulas for calculation of sPD for the different specifications of PD. Annex I provides rationales for the distinct PD specifications. Weighting functions in the integrands of Formula (7), Formula (8), and Formula (11) serve to avoid contributions, by scaling down the integrand at these regions to zero, from regions where the power density is oriented outward from the evaluation surface, or due to numerical inaccuracies for surfaces that are almost parallel to the direction of the Poynting vector.

NOTE 1 The formula used to calculate the PD depends on the applicable exposure guidelines or national regulations.

NOTE 2 The direction of the power density relative to the orientation of the evaluation surface was not considered in IEC TR 63170:2018 [10]. For compatibility with results that were assessed according to [10], weighting functions of Formula (8) and Formula (11) are not applied.

6.7.1.2 Surface-normal propagation-direction power density into the evaluation surface – sPD_{n+}

The surface-normal propagation-direction power density into the evaluation surface, sPD_{n+} , shall be calculated according to Formula (7).

$$sPD(r_0) = \frac{1}{\hat{A}(r_0)} \int_{A(r_0)} \Re\{S(r)\} \cdot n_A(r) \cdot \Theta[\Re\{S(r)\} \cdot n_A(r)] d\hat{A}(r) \quad (7)$$

where

- $\Re\{S(r)\}$ is the real part of the complex Poynting vector S at the location r ;
- $n_A(r)$ is the normal vector of the evaluation surface at the location r pointing into the evaluation surface, with $\|n_A(r)\| = 1$;
- $\Theta(x)$ is the Heaviside (unit step) function of x ;
- $\hat{A}(r_0)$ is the evaluation surface at to the location r ;
- r_0 is the location of the centre point.

NOTE 1 The surface normal propagating power density into the evaluation surface as defined in IEC TR 63170:2018 [10] corresponds to sPD_{n+} with $\Theta(x) = 1$.

NOTE 2 Formula (7) corresponds to power density crossing a surface A , i.e. the energy per unit time and unit area crossing a surface of area A_{av} .

6.7.1.3 Total propagating power density into the evaluation surface – $sPD_{\text{tot+}}$

The total propagating power density into the evaluation surface, $sPD_{\text{tot+}}$, shall be calculated according to Formula (8), along with Formula (9) and Formula (10).

$$sPD(r_0) = \frac{1}{\hat{A}(r_0)} \int_{A(r_0)} \|\Re\{\mathbf{S}(r)\}\| \cdot \Xi\{\cos^{-1}[\mathbf{n}_R(r) \cdot \mathbf{n}_A(r)]\} d\hat{A}(r) \quad (8)$$

with

$$\mathbf{n}_R(r) = \Re\{\mathbf{S}(r)\} / \|\Re\{\mathbf{S}(r)\}\| \quad (9)$$

$$\Xi(\theta) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \theta < 85^\circ \\ 1 - (\theta - 85^\circ)/5^\circ, & 85^\circ \leq \theta < 90^\circ \\ 0, & \theta \geq 90^\circ \end{cases} \quad (10)$$

$\|\Re\{\mathbf{S}(r)\}\|$ is the magnitude of the real part of the complex Poynting vector $\mathbf{S}$ at the location r

and the other terms are as specified in 6.7.1.2.

NOTE 1 The total propagating power density into the evaluation surface as defined in IEC TR 63170:2018 [10] corresponds to $sPD_{\text{tot+}}$ with $\Xi(\theta) = 1$.

NOTE 2 Formula (8) corresponds to magnitude of the real part of the Poynting vector on a surface A , i.e. an overestimation of results using Formula (7).

6.7.1.4 Total power density into the evaluation surface considering reactive near-field effects – $sPD_{\text{mod+}}$

The quantity $sPD_{\text{mod+}}$ is based on the total power density, and considers also the imaginary part of the Poynting vector to account for non-propagating energy transfer in the reactive near-field. It shall be calculated according to Formula (11).

$$sPD(r_0) = \frac{1}{\hat{A}(r_0)} \int_{A(r_0)} \left[\left(\|\Re\{\mathbf{S}(r)\}\| \cdot \Xi\{\cos^{-1}[\mathbf{n}_R(r) \cdot \mathbf{n}_A(r)]\} \right)^2 + \left(\|\Im\{\mathbf{S}(r)\}\| \right)^2 \right]^{1/2} d\hat{A}(r) \quad (11)$$

$\|\Im\{\mathbf{S}(r)\}\|$ is the magnitude of the imaginary part of the complex Poynting vector $\mathbf{S}$ at the location r

and the other terms are as specified in 6.7.1.3.

NOTE Formula (11) corresponds to magnitude of the Poynting vector (real and imaginary parts) on a surface A , i.e. an overestimation of results using Formula (7) and Formula (8).

6.7.2 Post-processing procedure

Post processing shall include the following steps:

- a) determination of the Poynting vector on the evaluation surface (e.g. using field reconstruction algorithms). Where the plane-wave equivalent approximation is valid (see 7.4.2.1), the power density can be directly computed by measurement of the E-field magnitude or H-field magnitude using the far-field characteristic impedance η_0 ;
- b) determination of the power density from the Poynting vector according to Formula (7), Formula (8), and Formula (11). As example, according to Formula (8), the power density is obtained from the Poynting vector using Formula (12):

$$S_{\text{tot}} = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ (E_y H_z^* - E_z H_y^*) \hat{x} + (E_z H_x^* - E_x H_z^*) \hat{y} + (E_x H_y^* - E_y H_x^*) \hat{z} \right\} \quad (12)$$

where

$$\mathbf{E} = [\text{Re}(E_x) + j\text{Im}(E_x)] \hat{x} + [\text{Re}(E_y) + j\text{Im}(E_y)] \hat{y} + [\text{Re}(E_z) + j\text{Im}(E_z)] \hat{z}$$

$$\mathbf{H} = [\text{Re}(H_x) + j\text{Im}(H_x)] \hat{x} + [\text{Re}(H_y) + j\text{Im}(H_y)] \hat{y} + [\text{Re}(H_z) + j\text{Im}(H_z)] \hat{z}$$

Formula (12) can also be written as shown by Formula (13):

$$S_{\text{tot}} = \sqrt{S_x^2 + S_y^2 + S_z^2} \quad (13)$$

where

$$S_x = \frac{1}{2} \text{Re}(E_y H_z^* - E_z H_y^*)$$

$$S_y = \frac{1}{2} \text{Re}(E_z H_x^* - E_x H_z^*)$$

$$S_z = \frac{1}{2} \text{Re}(E_x H_y^* - E_y H_x^*)$$

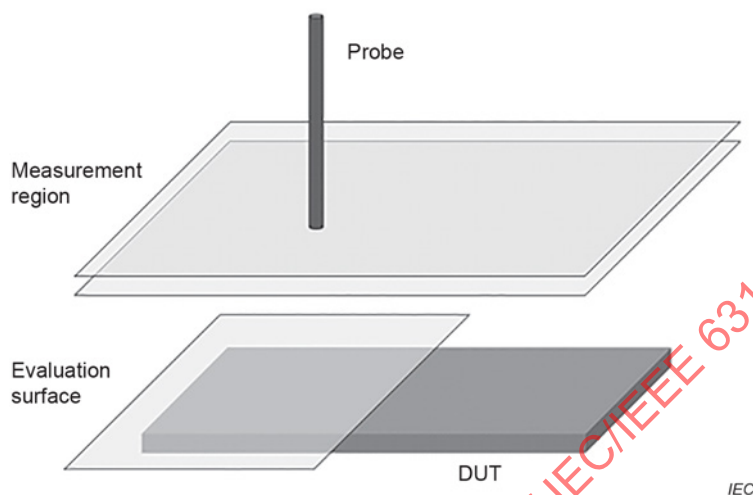
- c) spatial averaging of the power density over the required averaging area to determine the *sPD* on the evaluation surface, in accordance with 8.4 of IEC/IEEE 63195-2:2021. The rationale for use of square or circular shapes for power density averaging area in conformity evaluations is provided in Annex D;

NOTE 1 It is possible that applicable national regulations or exposure standards provide a different definition or interpretation for PD.

- d) determination of *psPD*, the peak value of the *sPD*, and any secondary peak spatial-average power density values (secondary peaks).

NOTE 2 Secondary peak measurements are not required if the *sPD* is determined on the entire evaluation surface.

Field reconstruction algorithms may be used to transform the measured fields in the measurement region to the Poynting vector on the evaluation surface (Figure 2) with known uncertainty. This may include intermediate steps such as calculating the H-field from the E-field (or vice versa) or retrieving field components and power densities from the measured data (e.g. the phase from the amplitude). See Annex E for more information on field reconstruction methods.



NOTE The measurement and evaluation surface dimensions, and their orientations and positions, are simplified for illustration purposes (see 7.2.4 for additional information).

Figure 2 – Simplified view of a generic measurement setup involving the use of reconstruction algorithms

6.7.3 Requirements

The following requirements apply to the post-processing.

- The power density on the entire evaluation surface shall be determined from the field measurements on the measurement region (e.g. using field reconstruction) with sufficient resolution to ensure that the $psPD$ uncertainty is within the value stated by the system manufacturer.
- The power density shall be determined from the Poynting vector (unless the plane-wave equivalent approximation is valid).
- The power density shall be spatially averaged over the specified averaging area (e.g. 1 cm^2 and/or 4 cm^2) of the relevant exposure standard or national regulations.
- The values and locations of the $psPD$ and any secondary peaks shall be recorded. Alternatively, the sPD distribution shall be provided.
- The uncertainty of the post-processor shall be determined.
- The limitations for which the uncertainty is valid shall be assessed (e.g. with respect to frequency, measurement region, etc.).
- The post-processing methods shall be documented by the system manufacturer including uncertainty and limitations.

Conformity with these post-processing requirements shall be documented by the manufacturer of the measurement system.

7 Protocol for PD assessment

7.1 General

A high-level flow-chart of the evaluation process for power density assessment is shown in Clause 5. Beginning with an evaluation plan and measurement approach, the process converges to the full power density evaluation and uncertainty analysis. Documentation and reporting complete the evaluation process.

NOTE This document does not contain information needed to configure DUTs for specific wireless technologies, including specific settings such as the operating mode or data rate to ensure that the maximum PD is obtained.

7.2 Measurement preparation

7.2.1 Relative system check

A relative system check according to the procedures of Clause A.3 shall be completed before performing PD assessment for a DUT. The relative system check evaluates field probe function, field probe calibration, scanning system, measurement instrumentation and post-processing. The requirements on relative system check are as follows.

- a) If the relative system check uses a source that does not have a traceable absolute target value, ensure that an absolute system check has been performed according to Clause A.4, or relative system check target value has been determined after the system validation or after the absolute system check at user site.
- b) The relative system check procedure shall be performed on the same PD measurement system used for evaluation of the DUT (see 7.4).
- c) The relative system check shall be performed such that all elements of the measurement system are valid for the DUT to be measured (e.g. if the verification is performed at a different frequency than the test frequency bands of the DUT, then the calibration parameters used in the verification shall be valid for the test frequencies).
- d) The relative system check shall meet the acceptability criteria in A.3.4.

NOTE 1 Because an absolute system check test fulfils all the requirements, an absolute system check test can also be performed instead of a relative system check.

NOTE 2 In case the system is based on a frequency-continuous sensor model valid over the entire frequency range, it is sufficient to perform the system check at the closest frequency of the verification antennas specified in Annex B. In case the system is based on a narrow frequency calibration, the verification is performed within the centre frequency of the measured DUT band $\pm 15\%$.

7.2.2 DUT requirements

The requirements of the DUT are as follows.

- a) The antenna(s), battery and accessories shall be those specified in the user manual. If this information is not available in the user manual, DUT should be equivalent to production line samples to be sold on the market. Accessories that have been approved for use with the DUT by the device manufacturer shall also be considered (e.g. additional accessories that are available on the manufacturer's website that have been approved for use with the DUT). They shall be documented in the measurement report.
- b) All antennas, their location and size, including arrays and sub-arrays, shall be identified.
- c) The battery shall be fully charged before each measurement and no external connections or cables affecting the result shall be used.

A lower battery level, not less than 60 %, is allowed provided it is demonstrated that the power level has not dropped by more than the DUT drift uncertainty.
- d) When national regulatory agencies allow tests to be performed on prototypes, verification shall be undertaken by the device manufacturer to ensure the commercial version has the exact same mechanical, electrical, and operating characteristics as the tested prototype. Where this cannot be guaranteed, testing shall be repeated by sampling of unmodified commercial product versions.

- e) Accessories that can affect the RF output power or RF current distribution of the DUT shall be tested according to the intended use conditions.
- f) Transmitters operating, for example, below 6 GHz can influence the PD of the transmitters due to coupling with the probe, etc., and such influences shall be taken into account. If the coupling from other active transmitters cannot be filtered out (e.g. frequency-selective measurement system), other transmitters shall be inactive during the measurement.

7.2.3 DUT preparation

The following requirements apply when preparing the DUT for testing.

- a) The RF output power and frequency (channel) shall be controlled either by a wireless link or test mode software (active mode). Alternatively, an external generator or a synthesiser and amplifier may be used to replace the transmitter (passive mode), provided that both the measured fields and the power density assessment of the DUT are unaffected, and the impact on power density assessment uncertainty is properly evaluated and remains acceptable. The power chains to all transmitting elements of the antenna array(s) shall be evaluated to accurately determine the input power fed to the antenna.

NOTE 1 National regulations can exist regarding the use of an external generator or a synthesiser and amplifier in place of the transmitter.

NOTE 2 In practice it can be difficult to use external signal generators, etc., to replace a DUT and have the same field distribution.

- b) When beamforming is supported by the device, the beam shall be fixed for the duration of the PD evaluation, to facilitate consistent results.
- c) Record the maximum time-averaged output power of the DUT for each tested frequency band and operating mode. If power scaling is obtained using call handling (see 7.4.3.2), record the time-averaged output powers of N_c channels as specified in 7.4.3.3 for each tested frequency band.

NOTE 2 The maximum time-averaged power of the DUT can be verified, e.g. if applicable, by conducted power measurements with a fully charged battery or according to radiated power measurements and other operating parameters to support the scaling.

- d) If performing measurement of simultaneous transmission of uncorrelated or Type 2 correlated signals (see 7.5), establish the maximum output power for each transmitter and antenna as described in step a) to ensure the aggregate transmit power from all antennas is also at the maximum.
- e) If the DUT is capable of controlling its transmit power over time to maintain the time-average power density below the applicable limit, the time period averaging procedure in IEC/IEEE 62209-1528:2020 may be applied. If the frequency and relative phase between transmitting elements is kept constant, it is sufficient to measure the amplitude of the E-field, H-field, or Poynting vector at a fixed location. Otherwise the power density shall be measured at the evaluation surfaces. The relevant time-averaging period or periods is/are specified in accordance with international guidelines (e.g. ICNIRP [2]) or national regulations. The time-averaging test procedure in IEC/IEEE 62209-1528:2020 only applies to devices that have network-independent capability to control transmission power over specific durations and intervals.

NOTE 3 Some regulatory authorities can have other or different requirements for PD measurements of devices supporting power control and time averaging.

- f) Record whether proximity sensors are used to lower the output power and the DUT positions and operating modes where proximity sensor activation applies. Verify whether the proximity sensor activation or deactivation is affected by the measurement system. In case the proximity sensor system is affected, either the proximity sensor shall be forced into activation or deactivation mode using test software, as appropriate, or when possible the measurement shall be taken in a separation distance at which the proximity system is not affected. The procedures of 7.7 in IEC/IEEE 62209-1528:2020 may be used to determine the proximity sensor triggering distances. If the proximity sensor performs or triggers time period averaging, the proximity sensor procedure in IEC/IEEE 62209-1528:2020 may be applied with time period averaging deactivated.

7.2.4 Selecting evaluation surfaces

7.2.4.1 General

The device manufacturer shall indicate all device positions that are applicable for the DUT (e.g. via user manual). National regulatory requirements also exist. The locations and orientations of the evaluation surfaces shall be determined based on the specified device positions and usage.

The shape of the evaluation surface depends on the exposed region of the body. 7.2.4.2 specifies the flat evaluation surface to be used for evaluating exposure in the torso or other locally flat regions of the body. 7.2.4.3 specifies the SAM surface for PD evaluations when the device is evaluated in voice-mode at the ear. If the SAM surface for PD or flat evaluation surfaces are not applicable, 7.2.4.5 specifies specific evaluation surfaces to be used.

Projection of the measured fields onto any non-planar evaluation surface shall be carried out applying the procedure of 8.3 of IEC/IEEE 63195-2:2021. This involves constructing surfaces around each centre point. The surface has an area that is the intersection of the evaluation surface with a sphere of radius $r_T = \sqrt{A/\pi}$. Triangulation algorithms are used to divide the non-planar evaluation surface into a set of triangles, and the step-by-step procedure in 8.3 of IEC/IEEE 63195-2:2021 is applied.

7.2.4.2 Body-worn evaluation surfaces

The evaluation surface is flat for exposure of the torso or other locally flat regions of the body. The shape and extent of the evaluation surface corresponds to the inner surface of the virtual flat phantoms including elliptical flat phantom described in IEC/IEEE 62209-1528:2020.

The evaluation distance (distance from DUT to evaluation surface) is the separation distance (distance from DUT to the outer surface of the virtual phantom) plus the 2 mm shell thickness. This enables total exposure ratio (TER) evaluations at the same surfaces as described in 7.5.

NOTE Touch would be 2 mm from the surface of the device. However, some regulators can also directly specify the evaluation distance including the shell, i.e. 2 mm. This needs to be clarified prior to doing testing.

When performing measurements for body-worn exposure, the separation distance shall be set according to the following three hierarchical options:

a) Regulatory requirement

If there is a regional, territorial or country-specific regulatory requirement which specifies the DUT separation distance, the DUT shall be positioned according to this requirement.

b) "Intended use distance" specified by the manufacturer

If there is no regulatory requirement, then the intended use condition or separation distance specified by the manufacturer shall be used. This information shall be acquired from the user documentation that accompanies the DUT.

c) Default separation distance

If neither of the previous options are applicable, then the DUT shall be measured with each accessible face at 0 mm separation distance.

7.2.4.3 Held at ear evaluation surfaces

If the device is intended to be held on the ear during voice calls (voice-mode, including e.g. VoIP mode), four evaluation surfaces shall be tested, corresponding to the cheek and tilt positions on the left and right sides of the head as specified in IEC/IEEE 62209-1528:2020.

The basis of the virtual evaluation surfaces is the inner surface of the SAM phantom described in IEC/IEEE 62209-1528:2020. The geometric parameters of the SAM phantom are based on anthropometric data from Gordon et al. [11]. The rationale for the SAM shape for SAR is provided in IEC/IEEE 62209-1528:2020.

The only modification to the SAM phantom for PD evaluation is the pinna; i.e. at the pinna, the inner surface of the SAM phantom is modified from that described in IEC/IEEE 62209-1528:2020. The inner surface is 2 mm from the outer surface of the SAM phantom at all points. Figure 3 and Figure 4 show the SAM head surface for SAR evaluations and the SAM surface for PD evaluations, respectively.

The tilt positions may be excluded if it can be demonstrated for any phase and amplitude configuration that the exposures in the tilt positions are likely to be more than 3 dB below the exposure in the corresponding cheek positions. Supporting information shall be provided in the test report (i.e. based on the location of the antenna array on the DUT).

NOTE 1 The exposure of the pinna is directly evaluated in this document as applicable guidelines do not distinguish between body and extremities above 6 GHz.

NOTE 2 IEC/IEEE 62209-1528:2020 has further information on statistical approaches to support the elimination of the tilt position for SAR.

NOTE 3 Research on conservativeness of this choice of evaluation surfaces for PD will be considered for future amendment of this document.

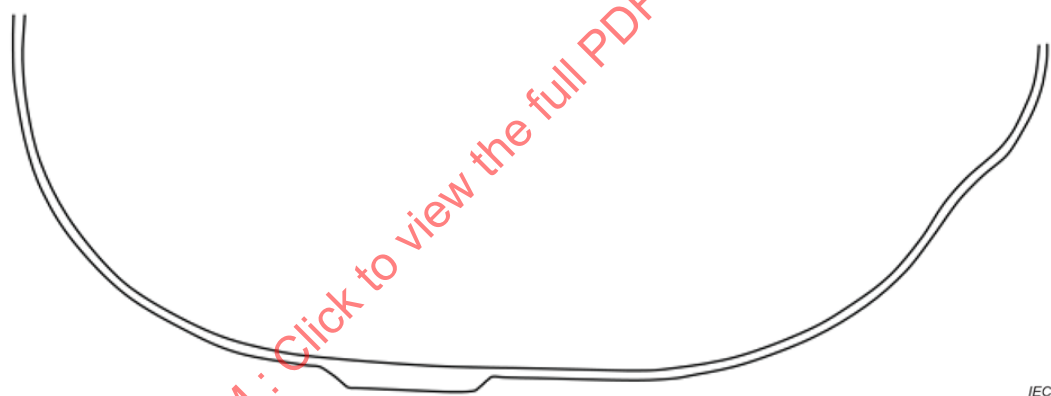


Figure 3 – Cross-sectional view of SAM phantom for SAR evaluations at the reference plane, as described in IEC/IEEE 62209-1528:2020

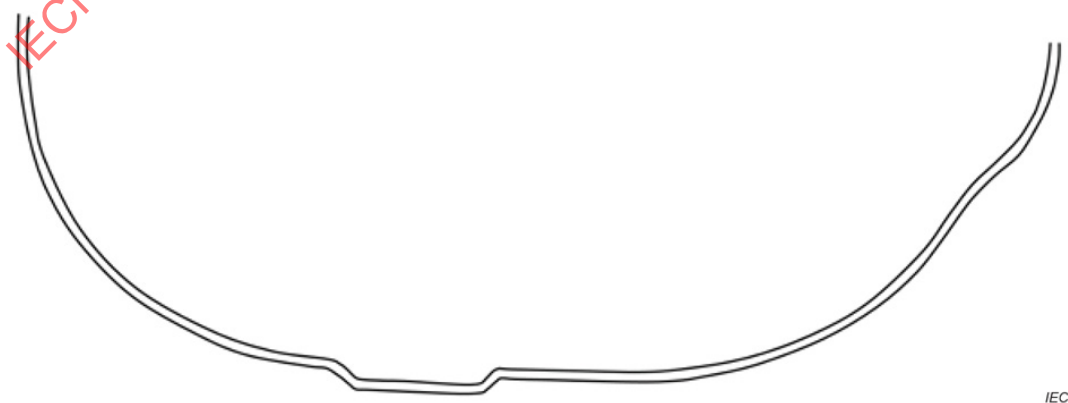


Figure 4 – Cross-sectional view of SAM virtual phantom for PD evaluations at the reference plane (shell thickness is 2 mm everywhere, including at the pinna)

7.2.4.4 Evaluation surfaces when held at other locations of the head

If the intended use is at other locations of the head, such as the front of the face or top of the head, the DUT position and the evaluation surface shall be described in the test report. The position of the evaluation surface shall always be chosen in such a way that a conservative estimate assessment with respect to the distance between the DUT and the head of the user results.

A simple option is to use the body-worn evaluation surface (7.2.4.2) for side(s) of the DUT intended to be held at the head, using the default evaluation distance (7.2.4.2 c)).

NOTE Research on conservativeness of this choice of evaluation surface will be considered for future amendment of this document.

7.2.4.5 Specific evaluation surfaces

Device specific evaluation surfaces other than those specified in 7.2.4.2 and 7.2.4.3 shall be used if the flat surface or SAM surface does not allow a conservative estimate of the exposure and the device is intended for operation on other parts of the body than the head or torso.

Exposure of the hands or limbs shall be considered in the case of hand-held or limb-worn devices (e.g. mobile phones, small hand-held phablets) at appropriate separation distances. Until representative surface is developed and introduced in this document, body-worn evaluation surface can be considered for this purpose.

NOTE The vast majority of the time, appropriate separation distance for hands or limbs will be at touch position. When a different separation distance is used, a rationale is provided in the test report and to the regulators to support the request.

Examples of device specific evaluation surfaces (i.e. inner surfaces of specific phantoms) are described in IEC/IEEE 62209-1528:2020. Justification for the use of specific evaluation surfaces shall be documented in the test report. Alternative device positioning procedures may also be required.

7.2.4.6 Coordinate system for DUT positioning

Coordinate systems for the acoustic reference points and vertical and horizontal centre lines of DUT (see Figure 6) facilitate the accurate positioning and orientation of the evaluation surface on the virtual phantom. Reference points and axes on the DUT shall be specified based on the shape and size of the DUT. The scanning system shall correlate these points so that the evaluation surfaces on the phantom can be correctly aligned to the DUT.

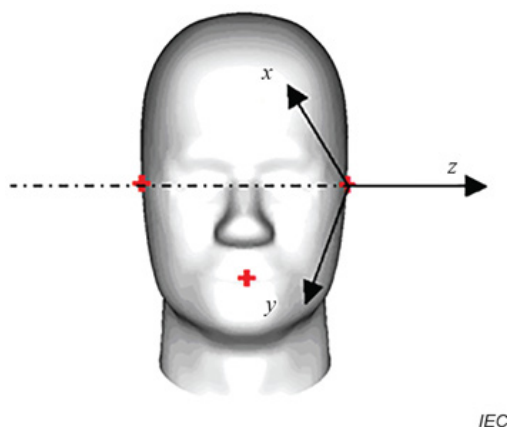
The offset and rotation between these reference coordinate systems can be used to provide an unambiguous description of device position relative to the evaluation surface. A definition of the coordinate system for the left ear reference point (ERP) is illustrated in Figure 5.

The x -, y - and z -axes shall form a right-handed coordinate system. For the left ERP, the axes are specified as follows.

- a) The z -axis is specified by a connecting line between the left and the right ERPs, and points from the right to the left from the point of view of the virtual phantom. The $z = 0$ origin is at the left ERP.
- b) The y -axis lies in the reference plane along the back-to-mouth (B-M) line and is perpendicular to the z -axis.
- c) The x -axis is perpendicular to the reference plane along the neck-to-front (N-F) line and cuts the reference plane at the left ear reference point.

For the right ERP, the reference coordinate system can be specified analogously. A definition of a DUT reference points and axes are shown in Figure 6.

For the flat phantom, the x -axis and y -axis are parallel to the virtual flat phantom shell and the z -axis is perpendicular to it.

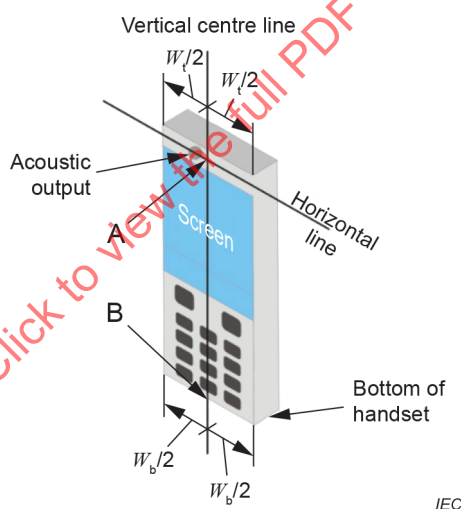


IEC

Key

x, y, z Axes of the coordinate system relative to the virtual SAM phantom

Figure 5 – Example reference coordinate system for the left-ear ERP of the SAM phantom



IEC

Key

w_t Width of the handset at the level of the acoustic output

w_b Width of the bottom of the handset

A Midpoint of the width w_t of the handset at the level of the acoustic output

B Midpoint of the width w_b of the bottom of the handset

Figure 6 – Example reference points and vertical and horizontal lines on a DUT

7.3 Tests to be performed

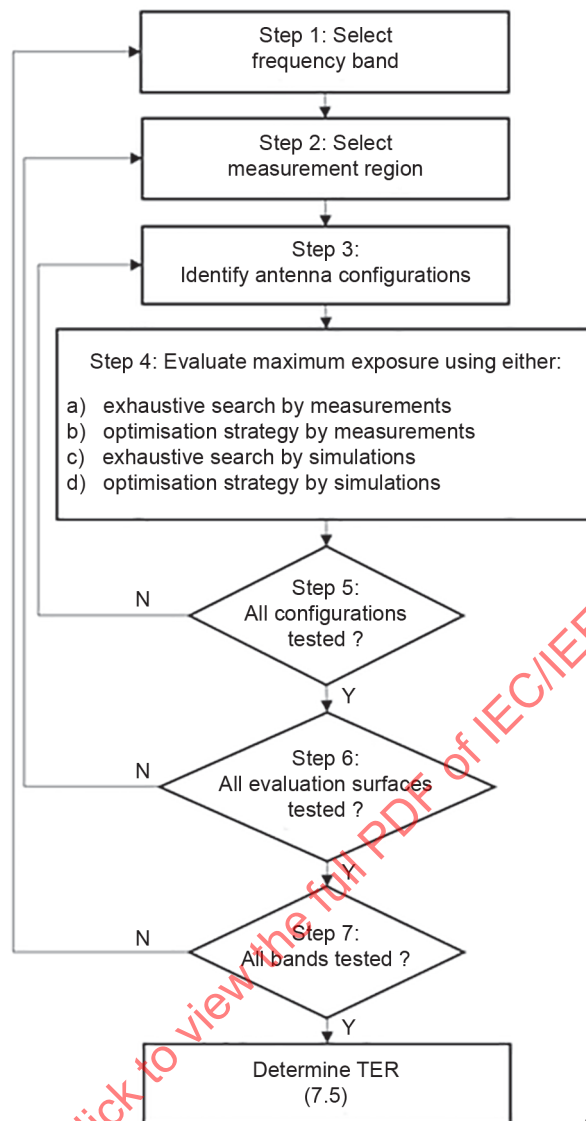
7.3.1 General

The total exposure from the DUT is determined from power density evaluations and exposure combining using the following steps (see also Figure 7).

- 1) Select a frequency band of the DUT (see 7.2.3).

- 2) Select a measurement region for the frequency band of step 1) that allows power density to be determined on evaluation surface(s) based on the specified DUT positions (see 7.2.4).
- 3) Identify all the antenna configurations of the DUT for the measurement region of step 2). For Type 1 correlated signals (see 7.5) that includes all applicable phase and amplitude combinations of an array or sub-array. When a codebook defining the amplitude and phase combinations is known, apply the codebook.
- 4) Evaluate the maximum exposure cases among the antenna configurations identified in step 3). Any of the following approaches may be used (see also Annex C of IEC/IEEE 63195-2:2021 for maximum-exposure evaluation techniques, which also need to be validated and documented following the procedure of Annex H of IEC/IEEE 63195-2:2021).
 - a) Exhaustive search by measurements: If the number of antenna configurations can be practically applied, measure all antenna configurations. For each measurement, apply the procedure of 7.4. Choose the configuration with the highest $psPD$.
 - b) Optimization strategy by measurements: Use an optimization strategy based on measurements of a sufficient subset of antenna configurations allowing to evaluate all configurations (see 7.3.3). For each measurement, apply the procedure of 7.4. The optimization strategy shall determine an upper bound of the $psPD$ and the maximum error (e.g. see Reboux et al. [12], Teniou et al. [13]).
 - c) Exhaustive search by simulations: Perform numerical simulations for all antenna configurations identified in step 3) to determine the test configuration with highest $psPD$. See 7.3.2 for details on the simulation approach and model validation against measurements. The $psPD$ for the test configuration with highest $psPD$, and other configurations as described in 7.3.2, shall be measured.
 - d) Optimization strategy by simulations: Use an optimization strategy based on numerical simulations of all independent antennas to determine the test configuration with highest $psPD$. See 7.3.2 for details on the simulation approach and model validation against measurements. The $psPD$ for the test configuration with highest $psPD$, and other configurations as described in 7.3.2, shall be measured.

For the configuration with the highest $psPD$, record the $psPD$, and the sPD distribution or any secondary peaks.
- 5) Go back to step 3) until all antenna configurations (e.g. sub-arrays) have been tested.
- 6) Go back to step 2) until all evaluation surfaces have been tested.
- 7) Go back to step 1) until all frequency bands have been evaluated.
- 8) Determine the total exposure ratio (TER) including summation of exposures from any simultaneous transmission modes (see 7.5).



IEC

Figure 7 – Flow chart for test procedure in 7.3

7.3.2 Tests to be performed when supported by simulations of the antenna array

A numerical modelling assessment of the DUT may be used to determine the maximum exposure cases among a set of amplitude and phase combinations, as described in IEC/IEEE 63195-2:2021.

The numerical DUT model shall be validated (in accordance with 7.5 of IEC/IEEE 63195-2:2021) to make sure that the numerical predicted configuration resulting in maximum exposure is indeed conservative for the evaluated transmitters. This implies that configurations of the antenna array or antenna sub-array including amplitude and phase information are known and controllable for the measurements in order to validate the relative numerical DUT model.

The procedure has the following steps.

- At the given frequency band, and measurement region determined from 7.3.1., identify the highest simulated $psPD$, denoted $psPD_{sim,max}$, from all the simulated $psPD$ results, denoted $psPD_{sim,i}$, where $i = 1$ to N amplitude and phase combinations.
- At the given maximum test configuration identified from step a) measure the power density, denoted $psPD_{meas,max}$.

- c) Measure the power density for all test configurations where the condition of Formula (14) is met.

$$psPD_{sim,i} > psPD_{sim,max} \times \left(B_{sim} - \sqrt{B_{sim}^2 - 1} \right) \quad (14)$$

where

$$B_{sim} = \frac{1}{1 - (1,64 U_{sim,rel})^2} \quad (15)$$

$U_{sim,rel}$ in Formula (15) is the relative uncertainty ($k = 1$) of the simulation tool, at the given frequency band, and with the measurement region determined in accordance with 7.3.1.

NOTE 1 The relative uncertainty $U_{sim,rel}$ is the uncertainty of the simulation with the absolute amplitude uncertainty reduced to relative amplitude uncertainty for the independent antenna elements while the absolute phase uncertainty is still considered. See Clause 9 of IEC/IEEE 63195-2:2021 for uncertainty evaluation of the simulations.

NOTE 2 As an example, for a simulation tool having a relative uncertainty ($k = 1$) of 10 %, all simulated antenna configurations exceeding 80 % of the maximum measured $psPD$ will be repeated using full power density.

- d) Measure the power density for all test configurations where the condition of Formula (16) is met, if not already done.

$$psPD_{sim,scaled,i} > psPD_{limit} \times \left(B_{sim} - \sqrt{B_{sim}^2 - 1} \right) \quad (16)$$

where $psPD_{sim,scaled,i}$ is a simulated result scaled by maximum value of the ratio $psPD_{meas,i} / psPD_{sim,i}$.

- e) Verify that all measured and simulated $psPD$ performed at the same frequency band, measurement region, and antenna configuration are within the combined uncertainty ($k = 2$) of simulation and measurement as given by Formula (17).

$$E_n = \frac{\left(psPD_{sim,scaled,i} - psPD_{meas,i} \right)^2}{\left(psPD_{sim,scaled,i} \times U_{sim(k=2)} \right)^2 + \left(psPD_{meas,i} \times U_{sys(k=2)} \right)^2} \leq 1 \quad (17)$$

where

E_n is the normalized error;

U_{sim} is the expanded uncertainty ($k = 2$) of the simulation code, at the given frequency band, and measurement region determined from 7.3.1. See Clause 9 of IEC/IEEE 63195-2:2021 for uncertainty evaluation of the simulations;

U_{sys} is the expanded uncertainty ($k = 2$) of the measurement system, at the given frequency band, and measurement region determined from 7.3.1.

The errors should be combined by RSS in the transformation that corresponds most closely to a Gaussian distribution. Because most of the errors are log-normal distributed, the combined uncertainty should be computed as RSS in decibel (dB). Examples are given in Newell [14], and ETSI ETR 028 [15].

- f) If $E_n > 1$, then the measurement procedure of 7.3.3 shall be applied for all configurations with measured result within relative uncertainty of the measurement system from the limit.

7.3.3 Tests to be performed by measurements of the antenna array

The conservative power density exposure can also be assessed by measurements only using phase recovering techniques combined with optimization techniques (Reboux et al. [12]).

This technique limits the number of required measurements to the number of independent configurations of the antenna array or antenna sub-array. If necessary, the determined maximum configuration can be remeasured, or the conservative maximum value can be used for conformity.

NOTE The number of sufficient independent configurations depends on the optimization technique used; see Annex C of IEC/IEEE 63195-2:2021 for maximum-exposure evaluation techniques.

7.4 Measurement procedure

7.4.1 General measurement procedure

The measurement system shall conform to the requirements of Clause 6. The general measurement procedure is as follows.

It is recommended to apply this measurement procedure using the operating mode and channel having the maximum available output power, to avoid excessive scaling in step f) and to facilitate good signal to noise ratio.

- a) First reference: Measure the local E-field or H-field at a point within the measurement region and where the field is within 3 dB of the maximum value or at least 20 dB above the noise level. This reference level will be used to assess output DUT drift during the measurement (see 7.4.4).

NOTE 1 If the location of maximum field value or a location of at least 20 dB above the noise level is not known, a pre-scan can be used to find such a location. No requirements on the size, resolution, or number of points in the pre-scan are needed, because the pre-scan is only used to find a suitable point for reference measurements.

- b) Field scan: Measure the fields over the measurement region as described in 7.4.2. Different measurement techniques are applied depending on the measurement system and whether the evaluation surface is in the far-field. The scan shall conform to the requirements of 6.5.

NOTE 2 The scan can include a combination of methods to reduce the measurement time, as long as this does not increase the measurement uncertainty. One example is to first perform a scan while the probe is continuously moving over the measurement region, then measure discrete points in a sub-region where the fields are at least –17 dB of the applicable exposure limit.

- c) Check that the peak is captured: Calculate the sPD on the evaluation surface from the fields in step b) and ensure that the $psPD$ is accurately evaluated. The averaging area A_{av} for the calculation of $psPD$ is specified by the applicable exposure limits or regulatory requirements. Two checks shall be performed.

The first check is to ensure that sufficiently large region has been measured and the $psPD$ is not on the boundary of the evaluation surface. The extent of the scan area shall be such that the highest truncation level of the E-field or H-field shall be lower than the specification of the manufacturer for meeting the specified reconstruction uncertainty.

NOTE 3 The check that the $psPD$ is on the boundary only applies if the evaluation surface is a sub-region of the virtual phantom. If the evaluation surface is the full virtual phantom, then expanding the measurement region will not change the location of the $psPD$.

The second check is to ensure that the field reconstruction is not impacted by the measurement region size and therefore has no influence on the $psPD$ result. This can be tested by checking convergence of the two $psPD$ results. Calculate a second $psPD$ value using a subset of values from the existing measured data (e.g. having all results from edges of the measurement region removed). The difference between these two $psPD$ values shall be within the uncertainty of the measurement area truncation (TR , see 8.4.15). If the reconstruction technique is not used, this second check can be omitted;

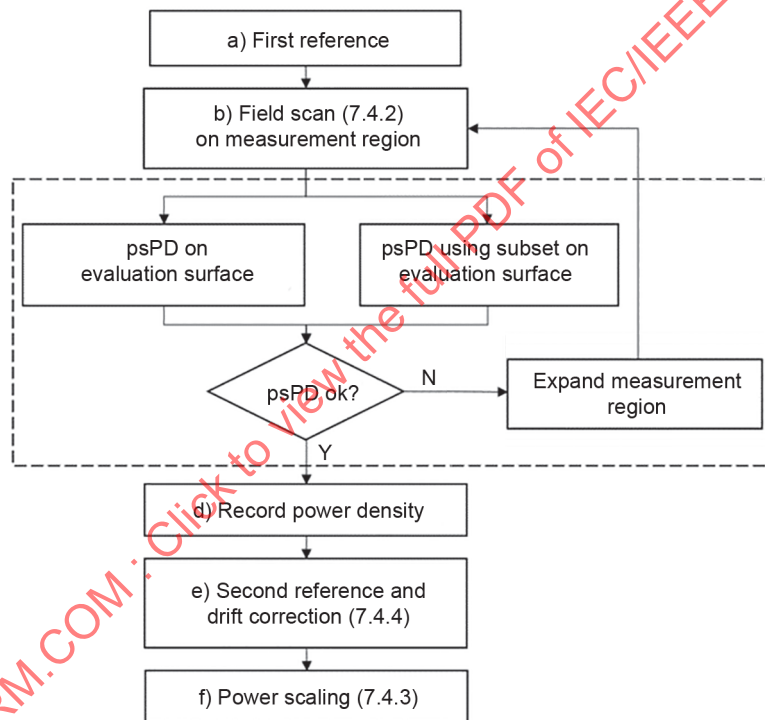
If either of these checks fails, expand the measurement region and go back to step b).

These two checks are recommended to be automated by the test system manufacturer, otherwise manual work is required.

NOTE 4 The calculations of the sPD and determination of the accuracy of the $psPD$ can be done while the scanning in step b) is taking place, so that any expansion of the measurement region is done without stopping the scan.

- d) Power density: Record the locations and values of the $psPD$ (single transmission evaluation) and the sPD over the evaluation surface (for multiple transmitter exposure assessment).
- e) Second reference: Measure the local E-field or H-field at the same location chosen in step a). The DUT drift is estimated as the difference between the squared amplitude of the field values taken in steps a) and e), as described in 7.4.4.
- f) Power scaling: Scale the power density to the highest value among the operating modes and channels applicable to the frequency band, as described in 7.4.3.

Measurement systems and techniques which conform with the general flow chart (Figure 8) can vary. Descriptions of each step are provided in the following subclauses, together with the applicability constraints for each step, the information required to implement the method and generic guidelines on how to characterize the uncertainty of the evaluation.



IEC

Figure 8 – Flow chart for general measurement procedure in 7.4.1

7.4.2 Power density assessment methods

7.4.2.1 Field regions

Traditionally, the boundary of the far-field is obtained from $2D^2/\lambda$, with the size of the antenna, D , and the operation wavelength, λ . Regardless, that boundary definition results in very conservative estimates of the far-field, and in turn leads to unnecessary burdens in field measurements and estimations. An equation from [16] provides a less conservative estimate and determines the far-field boundary using Formula (18).

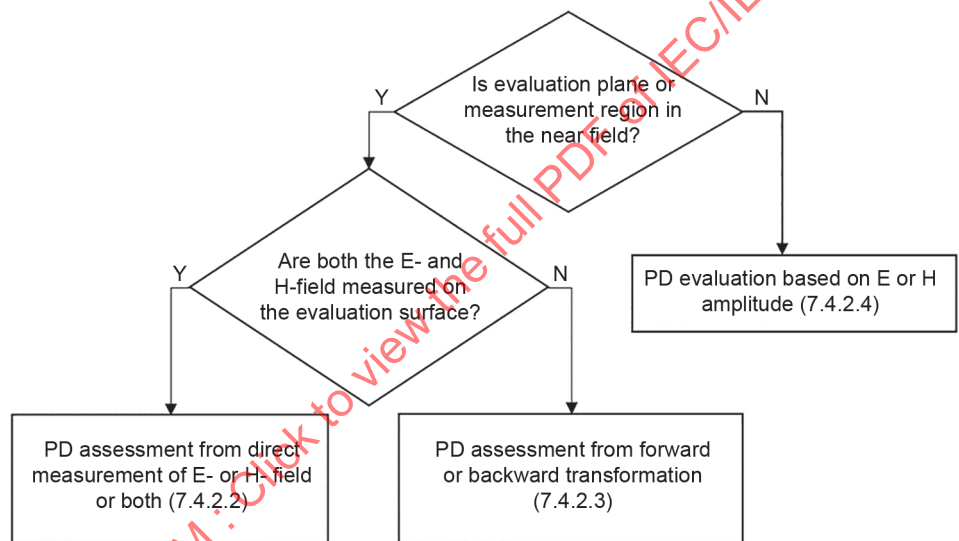
$$\lambda \times \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^{0,8633} \times \left[0,1673 \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^{0,8633} + 0,1632 \right] \quad (18)$$

Selected values for the far-field boundary are provided in Table 2. In the far-field, it is sufficient to only measure the amplitude of the E-field or H-field and approximate the local power density as $E^2/(377 \Omega)$ or $H^2 \times (377 \Omega)$; i.e. if both the measurement region and the evaluation surface are in the far-field, the procedure of 7.4.2.4 can be used. Additional information is provided in Annex H.

NOTE The validity of approximating power density using plane-wave equivalent power density for distances greater than or equal to the far-field boundary [16] has only been demonstrated for the main lobe; e.g. see Annex H. Additional evaluations need to be performed for the side lobes.

At distances closer than those listed in Table 2, the magnitudes and phases of both the E-field and H-field needs to be determined to evaluate $psPD$. The total field (magnitude and phase) can be measured directly or via phase reconstruction or by calculating one field (e.g. H-field) from the magnitude and phase of the other field. In this case use the procedure of 7.4.2.2 if the fields are measured directly on the evaluation surface that is in the near-field, or use the procedure of 7.4.2.3 if field reconstruction is used to transform the fields to the evaluation surface. Figure 9 is a flow chart for power density assessment methods.

The distance from all points in the measurement region to the DUT shall be chosen to avoid field perturbation by the probe(s). Field probe scattering uncertainty is described in 8.4.7.



IEC

Figure 9 – Flow chart for power density assessment methods in 7.4.2

Table 2 – Minimum evaluation distance between the DUT antenna and the evaluation surface for which the plane wave equivalent approximation applies

Antenna dimension	Minimum distance
$D = \lambda/3$	$0,35\lambda$
$D = \lambda$	$1,6\lambda$
$D = 2,5\lambda$	$6,8\lambda$
$D = 5\lambda$	21λ
NOTE D is the maximum linear dimension of the antenna operating in the selected configuration [16].	

7.4.2.2 Power density assessment from direct measurement of E-field or H-field or both

If the PD is directly measured on the evaluation surfaces, the procedure is as follows.

- a) Scan one field (E or H , or both E and H) on the evaluation surface. E-field and H-field magnitude or magnitude and phase shall be assessed and PD computed according to 7.4.1.
- b) Measurement spatial resolution and scan area depend on the measured field characteristic and measurement methodology used by the system. In the near-field, a step size of $\lambda/4$ or less is required. In the far-field, this requirement may be relaxed, e.g. $\lambda/2$ or less.

7.4.2.3 Power density assessment from forward or backward transformation

If the PD on the evaluation surfaces is determined by forward transformation or backward transformation of the fields, the procedure is as follows.

- a) Scan the E-field or H-field (magnitude or magnitude and phase) on the measurement region.
- b) Measurement spatial resolution and scan area depend on the measured field characteristic and measurement methodology used by the system. In general, if forward or backward transformation is applied, the scan area should be sufficiently large so as to meet the requirements of 7.4.1 c). The requirements shall be specified, validated, and documented by the manufacturer.

NOTE 1 Planar scanners typically require a step size of less than $\lambda/2$. When measurements are acquired in regions where evanescent modes are not negligible, smaller spatial resolution can be required (Carrasco et al. [17]). Similar criteria also apply to cylindrical scanning systems where the spatial resolution in the vertical direction can be less than $\lambda/2$. In the azimuth direction, the angular step size $\Delta\phi$ can be less than $\lambda/(2\rho_{\text{meas}})$ in radians, where ρ_{meas} denotes the radial distance at the measurement locations. For spherical systems, the maximum angular step sizes in elevation and azimuth can be specified analogously as $\Delta\theta = \Delta\phi = \lambda/(2R_{\text{meas}})$, where R_{meas} denotes the radial distance at the measurement locations. The positioning uncertainty of the field probe sensors at the measurement points can be analysed and documented.

- c) Calculate another field from the measured field using a reconstruction algorithm. Because the power density requires knowledge of both amplitude and phase, reconstruction algorithms may be used to obtain field components and power densities from the measured data (e.g. the phase from the amplitude if only the amplitude is measured).
- d) Forward transform or backward transform the fields to the evaluation surface (see Annex E).

NOTE 2 For backward transformation, it is possible that the measurements too far from the evaluation surface will not capture the reactive near-fields that also contribute to the PD.

7.4.2.4 Power density assessment based on the evaluation of E-field or H-field amplitude only

If the evaluation surface and measurement region are both in the far-field of the DUT (see Table 2) only the amplitude of the electric fields or magnetic fields need to be measured to determine the power density distribution. Measure the electric field or magnetic field amplitude on the measurement region. The measurement uncertainty due to the sampling resolution should be characterized and documented.

7.4.3 Power scaling for operating mode and channel

7.4.3.1 General

Two methods to scale the power density to the highest value among several operating modes are described. The first method measures all channels and operating modes within a frequency range, and it will result in the channel and operating mode having the highest exposure. It is a fast method if automated wireless methods are available for call handling. Otherwise, the second method may be used. This method does not require test modes support and synchronization with the measurement equipment, but it requires knowledge on the maximum time-averaged output power for a number of channels (see 7.4.3.3) within the tested band.

This procedure can also be used to find operating mode and channel combinations giving highest $psPD$ and to be used in step 1) of 7.3.1. In that case the location r in step a) of 7.4.3.2 shall be chosen to be in physical boresight of the antenna with no beam steering control applied. Steps a) to e) of 7.4.3.2 shall be performed to find maximum operating mode and channel combination to be used in rest of the steps in 7.3.1. For 7.4.3.2, the location r in step a) shall be chosen the same way, but steps a) to f) shall be performed.

7.4.3.2 Power scaling using automated call handling

When automated call handling (channel selection and operating mode handovers) is available, the following procedure may be used to scale the evaluated $psPD$.

- a) Identify the location r of the $psPD$ evaluated in 7.4.1, called $psPD_{\text{evaluated}}$. The E-field at this location and configuration is called $E_{\text{evaluated}}$.
- b) Select all operating modes where all of the following are true:
 - 1) the frequency band overlaps the frequency band of $psPD_{\text{evaluated}}$;
 - 2) the same RF amplifier stage is used;
 - 3) the same antenna, antenna array or antenna sub-array is used;
 - 4) the field probe calibration is valid;
 - 5) the output power at the channel in the centre of the frequency band is at least half of the output power of the test condition identified in step a).
- c) Select all channels for each operating mode of step b).
- d) Measure the E-field at the location r identified in step a) at each operating mode of step b) and channel of step c).
- e) Find the configuration (operating mode and channel) resulting in the highest measured E-field in step d), called E_1 .
- f) Measure the time-averaged output of the DUT for the configuration of step e), called $P_{1,\text{tested}}$, and the maximum time-averaged output power of the DUT for the same configuration, including production tolerances, called $P_{1,\text{max}}$.
- g) Scale the evaluated $psPD$ from 7.4.1 ($psPD_{\text{evaluated}}$) to the maximum value ($psPD_{\text{max}}$) using Formula (19).

$$psPD_{\text{max}} = psPD_{\text{evaluated}} \times \left(\frac{|E_1|^2}{|E_{\text{evaluated}}|^2} \times \frac{P_{1,\text{max}}}{P_{1,\text{tested}}} \right) \quad (19)$$

where

- | | |
|-----------------------|--|
| $P_{1,\text{max}}$ | is the maximum time-averaged output power of the DUT for all the operating modes of the tested frequency band; |
| $P_{1,\text{tested}}$ | is the time-averaged output power of the DUT for the configuration of step e). |

NOTE 1 In case H-field or direct PD is used as measurement metric, E-field in Formula (17) can be replaced with H-field or PD.

NOTE 2 If exposure combining is applied (see 7.5), the distribution of the sPD can be scaled by the same ratio.

7.4.3.3 Power scaling by additional measurements

The following procedure may be used to scale the evaluated $psPD$ for all the operating modes of a tested frequency band.

- a) Identify the location r of the $psPD$ evaluated in 7.4.1, called $psPD_{\text{evaluated}}$. The E-field at this location and configuration is called $E_{\text{evaluated}}$.

- b) Select other test channels within the tested frequency band. If the width of the transmit frequency band ($\Delta f = f_{\text{high}} - f_{\text{low}}$) exceeds 1 % of the centre frequency f_c , the number of channels N_c to be tested from the total number of channels N in the band shall be according to Formula (20):

$$N_c = \min \left\{ N, 2 \times \text{roundup} \left[\frac{10 \times (f_{\text{high}} - f_{\text{low}})}{f_c} \right] + 1 \right\} \quad (20)$$

If $N_c > 1$, the channels tested shall be equally spaced apart in frequency (as much as possible) and shall include the channels at the lowest and highest frequencies.

NOTE 1 Regulatory agencies can have different requirements on the number of channels to be tested per transmission band, according to frequency allocations and other wireless technology requirements.

- c) Measure the E-field at the location r identified in step a) for each channel of step b). Measurement shall be performed for whichever operating mode satisfying the following criteria:
- 1) the frequency band overlaps the frequency band of the operating mode in step a);
 - 2) the same RF amplifier stage is used;
 - 3) the same antenna, antenna array or antenna sub-array is used;
 - 4) the field probe calibration is valid;
 - 5) the output power at the channel closest to the centre of the frequency band is at least half of the output power of the test condition identified in step a).
- d) Find the channel providing the highest measured E-field, called E_1 .
- e) Scale the evaluated $psPD$ from 7.4.1 ($psPD_{\text{evaluated}}$) to the maximum value ($psPD_{\text{max}}$) using Formula (21).

$$psPD_{\text{max}} = psPD_{\text{evaluated}} \times \left(\frac{|E_1|^2}{|E_{\text{evaluated}}|^2} \times \frac{P_{1,\text{max}}}{P_{1,\text{tested}}} \right) \quad (21)$$

where

$P_{1,\text{max}}$ is the maximum time-averaged output power of the DUT for all the operating modes of the tested frequency band;

$P_{1,\text{tested}}$ is the time-averaged output power of the DUT for the configuration of step d).

NOTE 2 In case H-field or direct PD is used as the measurement metric, E-field in Formula (21) can be replaced with H-field or PD.

NOTE 3 If exposure combining is applied (see 7.5), the distribution of the sPD can be scaled by the same ratio.

7.4.4 Correction for DUT drift

The DUT drift during the PD measurement is calculated as the relative difference between first and any of the subsequent reference measurements (i of n), Ref_1 and Ref_i , respectively, per Formula (22).

$$\text{drift} = 100 \% \times \frac{Ref_i - Ref_1}{Ref_1} \quad (22)$$

One of the following measurement methods shall be used to determine the reference values.

- a) Perform single-point field measurements by the PD measurement system (see steps a) and e) of 7.4.3.2). Each reference measurement is performed at the same probe location. The reference is the square of the field.
- b) If the method in a) is not sensitive enough, an alternative is to measure the radiated power of the DUT. The reference is the far-field power at the angle of the peak antenna gain. This angle shall be determined ahead of time and is the same angle for each reference measurement Ref_1 and Ref_2 . The reference is the radiated power.
- c) An alternative if the method in a) is not sensitive enough is to make conducted power measurements on the device at the antenna port using a calibrated power meter. The reference is the conducted power.
- d) The measurements of Ref_1 and Ref_i are taken immediately before, during, and after the PD measurement (n), respectively. If it is not possible to do this accurately within the PD measurement process (e.g. due to the time involved in changing the measurement setup), Ref_1 and Ref_n may be measured separately from the PD measurement process, as long as the time interval between the two measurements is at least the longest intended PD measurement time.
- e) When the total DUT drift is 5 % or less, it shall be either reported in the uncertainty budget or treated as a systematic offset.
- f) Any DUT drift larger than 5 % shall be considered a systematic offset, and the PD measurement shall be compensated. In this case, the DUT drift uncertainty may be reported as zero.
- g) Compensation of the PD for the DUT drift is applied using Formula (23).

$$PD_{\text{compensated}} = PD_{\text{measured}} \times \left(1 + \frac{|drift|}{100 \%} \right) \quad (23)$$

- h) The DUT drift can also be directly applied to the measurement values during the scan, according to Formula (24).

$$PD_{\text{compensated}} = PD_{\text{measured}} \times \left(1 + \left| \frac{Ref_i - Ref_1}{Ref_1} \right| \right) \quad (24)$$

The uncertainty propagation due to this local compensation shall be well documented and applied.

7.5 Exposure combining

7.5.1 General

For DUTs with multiple antennas or multiple transmitters (with single or multiple antennas) transmitting simultaneously, the exposures shall be combined. This subclause describes how to combine the exposures to ensure that the total exposure is below the limit.

The total exposure ratio (TER) is calculated by combining all SAR measurements and power density measurements after normalizing to their respective limits. The general expression for uncorrelated signals is Formula (25). Specific expressions are given in 7.5.2.

$$TER(r) = \sum_{n=1}^N \frac{SAR_{\text{avg},n}(r, f_m)}{SAR_{\text{limit},n}} + \sum_{m=1}^M \frac{sPD_m(r, f_m)}{sPD_{\text{limit},m}(f_m)} \quad (25)$$

where

- r is a point on the evaluation surface;
- $TER(r)$ is the total exposure ratio at point r ;
- $SAR_{avg,n}(r)$ is the n -th spatial averaged SAR value at point r ;
- $SAR_{limit,n}$ is the limit value for $SAR_{avg,n}(r)$;
- $sPD_m(r, f_m)$ is the m -th sPD value at point r and frequency f_m ;
- $S_{limit,m}(f_m)$ is the limit value according to exposure guideline at the frequency f_m .

The TER shall be less than unity to ensure conformity with the limits.

NOTE 1 Formula (25) can be adapted to exposure metrics other than SAR when applicable, e.g. for electric field or magnetic fields limits at lower frequencies.

NOTE 2 SAR and S (sPD) are always uncorrelated.

Methods to combine the power density depend on whether the signals are correlated or uncorrelated in time (see also IEC TR 62630:2010 [6]), and whether the device transmits at lower frequency bands where the SAR is the relevant basic restriction. Simultaneously transmitted signals of a DUT fall under the following three categories of correlations in time.

- a) Type 1 correlated signals typically use beam forming techniques to employ multiple antennas to steer the beam to improve communication. The antennas are fed with signals whose relative phases change slowly with respect to the duration of the communication symbol.

Type 1 correlated signals are measured and combined as described in 7.4. Due to the potentially large number of phase and amplitude combinations, the upper bound of the power density distribution is determined during measurement.

- b) Type 2 correlated signals have fast phase changes with respect to the symbol duration. Some MIMO techniques use space-time block code to vary the phase from symbol to symbol. Beam forming is not used for Type 2 correlation.

Type 2 correlated signals are measured by performing a single scan with sufficient time averaging at each point such that the signal characteristics are captured and the integration time uncertainty is kept low. A Type 2 correlated signal is by definition not correlated to any other signal, including other Type 2 correlated signals, so it is treated as any other uncorrelated signal for the purpose of combining.

- c) Uncorrelated signals are not synchronized in time. Examples include two signals that operate at different frequencies or use different modulations.

Any combination of uncorrelated signals may be measured separately or together (i.e. from a single measurement while all signals are simultaneously transmitting), giving one spatial-average power density distribution, $sPD_m(r, f_m)$.

7.5.2 Combining power density and SAR results

- a) Use an appropriate evaluation surface containing the points r . This evaluation surface shall be common to all power density and SAR measurements.
- b) At each point r on the evaluation surface, assess each of the n spatial-average SAR values, $SAR_{avg,n}(r)$, and each of the m sPD values, $sPD_m(r, f_m)$.

Figure 10 illustrates how $SAR_{avg,n}(r)$ and $sPD_m(r, f_m)$ shall be specified for a body-worn evaluation surface (see 7.2.4.2). The spatial averaging is centred at point r , according to the applicable standard (e.g. 1 g or 10 g for SAR, 4 cm² in shape of square for power density in the example of Figure 10). If the peak spatial-average SAR corresponds to a cube that does not touch the evaluation surface, the cube shall be projected onto the evaluation surface without changing the value of the $psSAR$.

NOTE Projection onto the evaluation surface of a cube that does not touch the evaluation surface is a conservative approach. In this case, using the $psSAR$ for the cube that is on the surface would result in an underestimation of the combined exposure.

- c) Figure 11 shows how $SAR_{avg,n}(r)$ and $sPD_m(r, f_m)$ are specified for a voice-mode evaluation surface (see 7.2.4.3). At the pinna of the SAM phantom, the evaluation surface for SAR is different from the evaluation surface for power density, meaning that the specified points for combining (e.g. r_1 in Figure 11) are different. Otherwise, the points r (e.g. r_2 in Figure 11) are identical for SAR and power density combining.
- d) Normalize each of the $SAR_{avg,n}(r)$ values to its limit, $SAR_{limit,n}$.
- e) Normalize each of the $sPD_m(r, f_m)$ values to its limit, $S_{limit,m}(f_m)$.
- f) At each point r on the evaluation surface, linearly sum the normalized sPD distributions, among all ($m = 1$ to M) measurements (including all measured combinations). This includes uncorrelated signals, Type 2 correlated signals and the maximum sPD of correlated signals from 7.4.2.
- g) If some of the M distributions of sPD are not known, their $psPD$ values shall be added to the $psPD$ of the spatially-combined distributions, unless the $psPD$ values are at different locations such that adding them would produce less than 5 % higher total $psPD$.
- h) At each point r on the evaluation surface, combine all SAR measurements ($n = 1$ to N) as described in 7.4.4 of IEC/IEEE 62209-1528:2020.
- i) The TER is the highest exposure across all points r on the evaluation surface, according to Formula (26):

$$TER = \max_r \left\{ \sum_{n=1}^N \frac{SAR_{avg,n}(r, f_n)}{SAR_{limit,n}} + \sum_{m=1}^M \frac{sPD_m(r, f_m)}{S_{limit,m}(f_m)} \right\} \quad (26)$$

Formula (26) can be used directly only if the N spatial-average SAR distributions, $SAR_{avg,n}(r, f_n)$ and the M sPD distributions, $sPD_m(r, f_m)$ are known at all locations r on the evaluation surface.

- j) If the spatial distribution of the combined $psSAR$ from IEC/IEEE 62209-1528:2020, $psSAR_{combined}$, is not known, but the M sPD distributions are known, the TER is calculated using Formula (27).

$$TER = TER_{SAR} + TER_S = \frac{psSAR_{combined}}{psSAR_{limit}} + \max_r \left\{ \sum_{m=1}^M \frac{sPD_m(r, f_m)}{S_{limit,m}(f_m)} \right\} \quad (27)$$

As the most conservative estimate, the TER_S term in Formula (27) can also be calculated by using sum for the $psPD$ regardless of spatial location, i.e. as direct summation of peak exposure ratios.

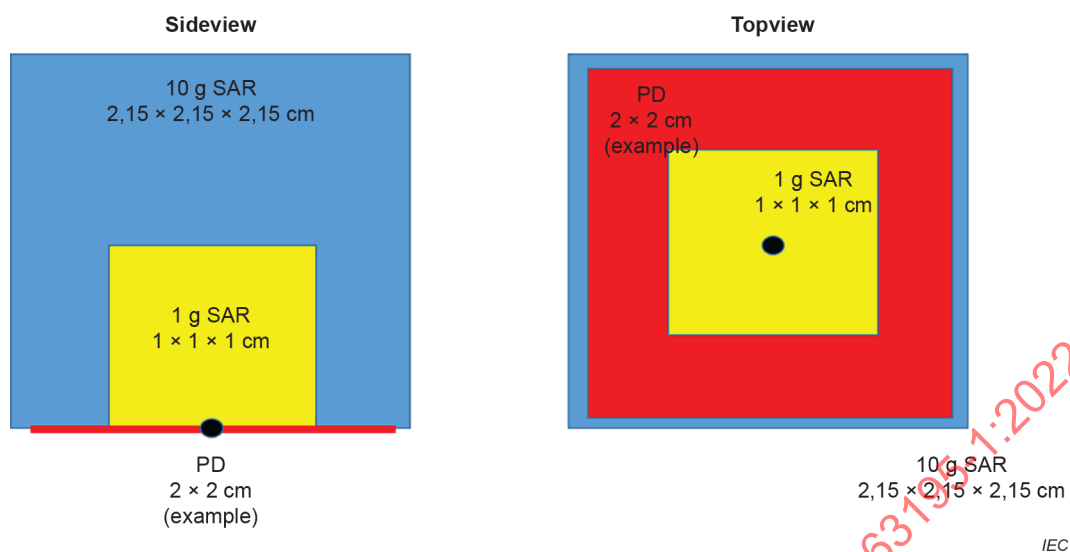
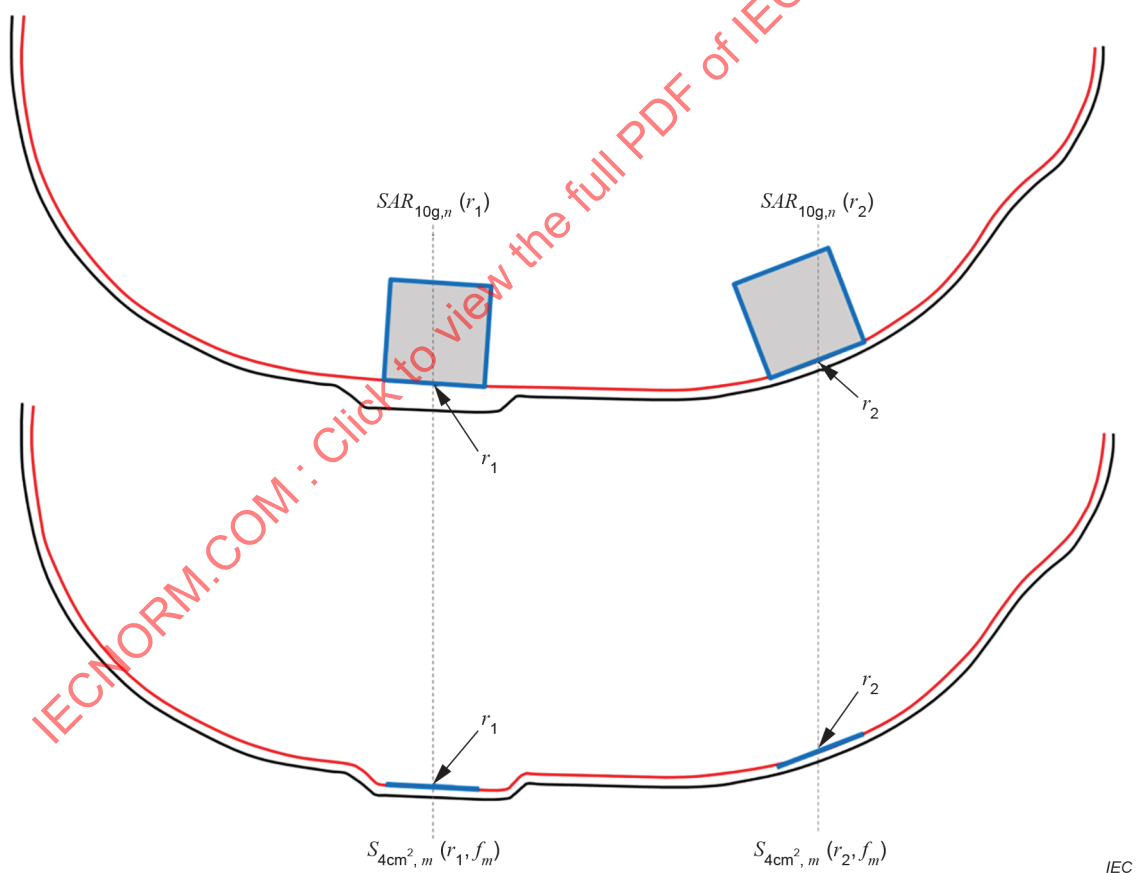


Figure 10 – SAR and power density evaluation at a point r



NOTE The evaluation surfaces are shown in red. At the pinna, the SAR averaging cube and power density averaging area combined at points (e.g. r_1) that are spatially different. Otherwise, the points (e.g. r_2) are identical for SAR and power density.

Figure 11 – Combining SAR (top) and power density (bottom) for the SAM phantom

8 Uncertainty estimation

8.1 General

The uncertainty budget is applicable to PD measurements either for head, body, or specific evaluation surfaces. Table 3 (see 8.6) is a template and Table 4 is an example uncertainty budget for 4 cm² or 1 cm² area-averaged PD measurement of a DUT.

A performance-based approach is applied in this document, which allows several different types of measurement techniques to be applied and places emphasis on validation to provide confidence in the results. The uncertainty budgets may therefore differ for different measurement techniques.

Each input quantity is described together with an example of how the associated standard uncertainty is evaluated. These are general examples that might not be applicable to all measuring systems, and additional quantities can be required in a specific case.

8.2 Requirements for uncertainty evaluations

The expanded uncertainty is the result of an uncertainty evaluation, specific details of which are recorded in an uncertainty budget. The expanded uncertainty shall be expressed either in percent if it has a normal distribution or in decibel (dB) if it has a log-normal distribution, as reported by the system manufacturer.

Separate uncertainty budgets shall be evaluated for PD measurements according to the following.

- a) The manufacturer of the measurement system is responsible for determining all uncertainty components in 8.4 and 8.5, except DUT alignment (*DA*), ambient conditions (*AC*), and DUT drift (*DRI*), which are the responsibility of the measurement laboratory.
- b) The expanded uncertainty in the measured value of the area-averaged PD (e.g. 4 cm²) shall be assessed in accordance with the guidance and explanation given in ISO/IEC Guide 98-3 [18].
- c) The frequency range for which the uncertainty analysis is valid shall be specified.
- d) The reported uncertainty shall represent the maximum expanded uncertainty within this range.
- e) The expanded uncertainty for the relative system check, absolute system check, and system validation measurements shall also be evaluated. The uncertainty shall be quoted at the 95 % confidence level, and the expanded uncertainty ($k = 2$) shall not exceed 2 dB (58 %/-37 %) of the *psPD* value from 20 % (less than -7 dB) to 200 % (more than +3 dB) of the applicable exposure limit.
- f) If the expanded uncertainty is greater than 2 dB (58 %/-37 %), reported data shall take into account the percentage difference between the actual uncertainty and the 2 dB (58 %/-37 %) target value; e.g. see method of IEC 62311:2019 [9].

8.3 Description of uncertainty models

The combined standard uncertainty of the measured power density is the root sum squared of uncertainty contributions, following the guidance of ISO/IEC Guide 98-1 [19] and ISO/IEC Guide 98-3 [18]. The following uncertainty terms influence the combined standard uncertainty:

- a) uncertainty terms dependent on the measurement system (see 8.4);
- b) uncertainty terms dependent on the device under test (DUT) and environmental factors (see 8.5).

The combining of the uncertainty terms to determine the total expanded uncertainty is described in 8.6.

The uncertainty models in Clause 8 are described in the following format:

$$\Delta PD = X_1 + X_2 + \dots$$

ΔPD is the output quantity corresponding to the combined PD assessment uncertainty. The input quantities are described by the symbols in 8.4 and 8.5.

For measurement of a DUT or antenna (without exposure combining), the total uncertainty is the combination of components according to Formula (28):

$$\begin{aligned} \Delta PD = & CAL + COR + FRS + SCC + ISO + LIN + PSC + PPO + PPR + SMO \\ & + FLD + MED + APN + TR + DAQ + SMP + REC + SNR + TRA + SCA + SAV \\ & + PC + MOD + IT + RT + DH + DA + AC + TEM + REF + MSI + DRI \end{aligned} \quad (28)$$

For measurement repeatability of a DUT or antenna (without exposure combining), the total uncertainty is the combination of components according to Formula (29):

$$\begin{aligned} \Delta PD = & ISO + LIN + PPO + PPR + PSR + MED \\ & + APN + TR + SMP + REC + SNR + TRA + SCA \\ & + SAV + PC + DH + DA + AC + MSI + DRI \end{aligned} \quad (29)$$

8.4 Uncertainty terms dependent on the measurement system

8.4.1 *CAL* – Calibration of the measurement equipment

Calibration uncertainty is assessed and documented by the measurement system manufacturer. Depending on the system implementation, the field probe is directly calibrated together with its readout electronics or the readout electronics is calibrated separately. In the latter case, the calibration uncertainty shall also take into account the influence of the connection of the probe and readout electronics after calibration, including connector losses and impedance mismatch.

8.4.2 *COR* – Probe correction

Probe correction is the difference between the receiving properties of the physical field probe and those of an ideal probe that measures the field at a point in space. This fact is especially important in close proximity to a source where fields can vary significantly over the volume of the probe. More information is available in IEEE Std 1720:2012 [20] about probe correction for specific near-field implementations (planar, cylindrical, and spherical). The uncertainty in the receiving properties of the field probe affecting probe correction is included.

8.4.3 *FRS* – Frequency response

8.4.3.1 General

Field probes do not have a flat frequency response. The frequency response is dependent on the field probe type and size and is assessed during field probe calibration.

The frequency response uncertainty depends on the characteristics of the acquisition unit of the system. Two main cases are presented in 8.4.3.2 and 8.4.3.3.

8.4.3.2 Frequency integration systems

For the measurement of wide-bandwidth signals, particularly if the frequency setting in the software is offset from the centre of the signal spectral power density $A(f)$, the FRS uncertainty shall be taken into account. For example, this can happen if resource blocks have an offset with respect to the centre frequency.

The additional uncertainty due to the spectral imbalance can be calculated for signals between signals having a bandwidth (BW) with f_0 in the centre of the bandwidth. The time-averaged signal spectral power density as a function of frequency is $A(f)$.

The FRS uncertainty contribution can be approximated using Formula (30):

$$FRS = s(f_0) \times \left| \frac{\int_{(f_0-BW/2)}^{(f_0+BW/2)} (f - f_0) \times A(f) df}{\int_{(f_0-BW/2)}^{(f_0+BW/2)} A(f) df} \right| \quad (30)$$

where $s(f_0)$ is the sensitivity gradient of the probe, in percent per hertz or decibel per hertz. The sensitivity gradient is calculated as the change in the sensitivity over the frequency range. It can be a fixed value or as a function of the centre frequency, f_0 .

If other than Formula (30) is used, justification shall be documented. For example, a measurement system may apply spectral weighting or other corrections during the measurement.

For the measurement of several signals transmitting simultaneously, the frequency response uncertainty shall be assessed by the measurement system manufacturer to determine a conservative bound for the uncertainty and the maximum frequency separation that can be applied for simultaneous transmission.

8.4.3.3 Frequency selective systems

For the measurement system capable of acquiring time-domain series of the desired signal, and equalizing the system frequency response, by using for example spectral analysis of the RF signal, the frequency response uncertainty can be negligible.

8.4.4 SCC – Sensor cross coupling

For probes having multiple sensors, the sensors and their transmission lines are ideally isolated from one another. In practice, however, there can be some cross coupling resulting in signal pickup at one sensor port that is due to field reading at another sensor port. Design of the probe(s) and manufacturing processes can minimize sensor cross coupling. Calibration may include compensation of cross coupling. However, it can be difficult to completely remove sensor cross coupling because it depends on the polarization, angle of incidence and distribution of the incident field.

Sensor cross coupling uncertainty shall be evaluated by taking the difference between the power density (or the square of the field) using one sensor in isolation from the power density (or the square of the field) using the same sensor together with the other sensors. Antennas with different polarizations and angles of incidence are required. The requirements for this assessment are as follows.

- The reference antennas used shall have a polarization purity (co-polarization to cross-polarization ratio) of more than 10 dB.
- The fields shall be within the dynamic range of the sensors.
- Any cross-coupling compensation that is evaluated during calibration shall be applied.
- If compensation is applied, the uncertainty of this compensation shall be reported and included in the total sensor cross coupling uncertainty.

8.4.5 ISO – Isotropy

Hemispherical isotropy is a measure of the deviation in field probe response to arbitrary field polarization. In general, fields emitted by small portable wireless devices are of arbitrary polarization. In the near-field of sources, the deviation from the hemispherical isotropy shall be considered. In case of assessments in the far-field with known propagation direction, the uncertainty can be reduced to the deviation from axial isotropy. If the isotropic measurement requires multiple measurements with different probe orientation (e.g. see Pfeifer et al. [4]), then the uncertainty evaluation shall be performed using the corresponding measurement and post-processing procedure.

8.4.6 LIN – System linearity error

The evaluation of system linearity error shall be performed such that all components of the system introducing potential non-linearities are assessed. For instance, if a field probe contains no non-linear element but its readout electronic does, then the tests to evaluate this uncertainty contribution includes the readout electronics. This evaluation is performed by measuring the PD over the dynamic range of the measurement system and determining the maximum deviation from the best-fit straight line that goes through the origin.

This evaluation is performed by a power sweep covering a local PD in the range of 10 % to 1 000 % of the applicable *sPD* limit (RMS for CW signals) in steps of 3 dB or less. The *LIN* uncertainty is defined as the maximum deviation in the PD versus power characteristic from the best-fit straight reference line going through zero specified over the interval of 10 % to 1 000 % of the applicable *sPD* limit ($PD = a \times P$, where a is the best-fit slope of the line, using the method of least-squares).

The *LIN* uncertainty for a CW signal is determined according to Formula (31):

$$LIN[\%] = \max_j \left\{ \max_{PD_l \leq PD(P_i)_{CW,j} \leq PD_h} \left(100 \% \times \left| \frac{PD(P_i)_{CW,j}}{a \times P_i} - 1 \right| \right) \right\} \quad (31)$$

Here, $PD(P_i)_{CW,j}$ is the power density measured for a CW signal at the i -th power level P_i , $PD_l = 10 \%$, and $PD_h = 1\,000 \%$ of the applicable *sPD* limit. The index j refers to the probe sensor, for each of which the procedure shall be repeated. A rectangular probability distribution is assumed for system linearity error uncertainty.

If particularly high or low PD values need to be measured, the low-to-high PD range used for the investigation (10 % to 1 000 % of the applicable *sPD* limit) can be extended to cover the entire system dynamic range as specified by the system manufacturer.

8.4.7 PSC – Probe scattering

The field scattered by a field probe is partly scattered back to the DUT to be retransmitted again. This effect depends on the frequency, the structure of the field probe and the field probe distance to the DUT. The reflection errors generally decrease with increasing measurement distance. For miniature rectangular or circular waveguide probes, a few wavelengths are typically necessary to avoid unacceptable field perturbation. For low-directivity DUT antennas, the distance may be reduced. The field perturbation of probes consisting of small dipole or small loop sensors to the measured field can be sufficiently small for distances down to a wavelength or even fractions of a wavelength.

Since this effect is a characteristic of a specific probe, it is determined by the system manufacturer during the field probe calibration. If algorithms are applied to compensate for the multiple reflections, then the PD uncertainty can be determined with the same evaluation hardware and software as is used for performing the measurements.

8.4.8 PPO – Probe positioning offset

The scanning system positions the field probe on the measurement region. Deviations in the field probe locations with respect to the true locations on the measurement region with respect to the device result in measurement uncertainty of the $psPD$ and errors when combining exposures from simultaneous transmitters. This is an absolute uncertainty and not a relative uncertainty because it transforms one to one to the evaluation of surface (e.g. if the measurement distance is 200 mm and the evaluation distance 2 mm, a deviation of 0,5 of the measurement surface (200,5 mm) results in an evaluation surface of 2,5 mm instead of 2 mm). For this reason, 6.5 includes requirements and procedures for the absolute positioning and orientation of the probe.

This uncertainty term is due to the accuracy of the absolute positioning and orientation of the probe. It is due to positioning biases in the mechanical positioning system and errors in the positioning procedure. A second uncertainty term, PPR , is the repeatability of the field probe positioning (see 8.4.9).

The procedure to evaluate PPO uncertainty is as follows.

- a) Determine the worst-case mechanical offset of the field probe position with respect to the DUT. This is determined by measuring the field probe location with respect to a reference point. The reference point shall be on the closest measurement region locations that are supported by the measurement system.
- b) Perform system validation as described in Clause A.5.
- c) Mechanically offset the field probe location by the offset determined in step a) and repeat the system validation.
- d) Calculate the uncertainty as the deviation between the $psPD$ values from the system validations of step b) and step c), i.e. $(|psPD_b) - psPD_c| / |psPD_b|)$. A rectangular probability distribution is applied.

This uncertainty may be expressed as a function of frequency, or as the maximum value across the evaluated frequency range.

8.4.9 PPR – Probe positioning repeatability

This uncertainty is due to the repeatability of the field probe positioning rather than the offset. The positioning repeatability is due to the finite positioning accuracy and the ability of the positioning system to repeatably locate the field probe at the same location. The deviation in the field probe position can vary from location to location on the measurement region.

This uncertainty term may be evaluated using a set of numerically generated vector field reference distributions of the validation sources in Annex B. The procedure is as follows.

- a) For each numerical distribution, the field is sampled at points and in polarizations which correspond to the measurement grid applied by the physical system.
- b) From these original sampled data, the peak spatial-average PD is computed using the same processing as used for measurements with this particular system. This gives the reference value, $psPD_{ref,i}$, for each field distribution case i (a number of i distributions is supposed per frequency).
- c) The known tolerance on field probe positioning repeatability is used to generate measurement scan grids G_j ($j = 1$ to J) affected by repeatability errors. The manufacturer shall make a model to represent such mechanical errors. For example, each tolerance may have a rectangular or triangular distribution if the manufacturer specifies maximum acceptable deviations from nominal locations. In the case of moving probes, the repeatability uncertainty of the probe positioning shall be included in the mechanical error. J sampled distributions of each reference vector field are then created by using the G_j sampling grids.

- d) For each reference field i and each grid j , the reconstruction algorithms of the measurement system are applied to compute the peak spatial-average PD, $psPD_{ref,i,j}$. The software shall assume ideal positions of the points in the grid. As a consequence, the algorithms are used as if sampled field values were obtained from a perfectly known position, whereas the system is actually sampling the field on a grid which deviates from the targeted locations.
- e) For each (i, j) pair, the relative difference $(psPD_{ref,i,j} - psPD_{ref,i}) / psPD_{ref,i}$ is computed.
- f) U_i is calculated for each reference field configuration i as the 95th percentile of the absolute value of the relative difference for all J field probe grid locations. The uncertainty is estimated as the RMS value of U_i across the applicable frequency range for all I exposure conditions. This value is calculated on $I \times J$ cases with $I \times J - 1$ degrees of freedom. A normal distribution is assumed.
- g) The assessed tolerance valid at the probe sensor location shall be translated to the uncertainty for the peak spatial-average PD and filled into Table 3. The translation is a function of the actual implemented 3D reconstruction and can only be performed by the system manufacturer. All steps shall be documented.

8.4.10 SMO – Sensor mechanical offset

The uncertainty is due to mechanical uncertainties in the sensor location inside the field probe housing during manufacturing. It is different from the field probe positioning offset which is due to the error of the mechanical positioning system. However, the two uncertainty terms may be evaluated together. The sensor location inside the field probe housing should be determined during field probe calibration. The residual error in the sensor location is translated into $psPD$ uncertainty by applying the same procedure as for PPO .

8.4.11 PSR – Probe spatial resolution

This is the uncertainty in the field probe to be able to resolve the peak local PD and is due to the finite size of the probe. Ideally, a field probe of infinitesimal size will pick up the field at the field probe location. In practice, the size of the field probe causes mechanical integration of the field over the sensor area. If there are multiple sensors in a probe, the physical displacement of the sensors might also affect the ability of the field probe to pick up the field accurately. This results in underestimation of the peak field, although compensation may be applied during calibration.

8.4.12 FLD – Field impedance dependence (ratio $|E|/|H|$)

For some field probes (e.g. waveguides), the measurement of the field is sensitive to the ratio of the local E-field magnitude and H-field magnitude. In the near-field (i.e. at distances between the DUT and the field probe that are less than the minimum distance in Table 2), the field impedance differs from the characteristic impedance of free space. The sensitivity with respect to the power density shall be characterized by experiment or numerical evaluations by exposing the sensors to different field impedances (see Annex D of IEC TR 63170:2018 [10] for guidance). The uncertainty can be reduced if the conditions for a restricted field impedance range can be specified, e.g. minimal distance between source and probe.

8.4.13 MED – Measurement drift

This term describes the influence of short-term and long-term measurement drift (both in amplitude and phase) on the measured PD. It is not related to the DUT drift. Short-term drifts (e.g. over a period of minutes or hours) are caused by influences such as equipment heating, electromagnetic interference and changes in ambient conditions. Long-term drifts (e.g. over a period of days to months) are caused by component drift, amplifier stability and long-term fluctuations in dielectric parameters of materials of field probe and related measurement equipment.

Measurement drift uncertainty is evaluated from trend analysis of the PD measurement taken at different times. The short-term drift and long-term drift are evaluated separately and combined assuming that they are statistically independent.

8.4.14 *APN* – Amplitude and phase noise

This is the component noise of the measurement system. Amplitude and phase noise are random fluctuations in the measurement due to short-term changes such as component noise. This uncertainty is evaluated from the data taken to estimate the uncertainty due to short-term amplitude and phase drifts. This uncertainty can be evaluated from measurement data taken at several frequencies across the applicable range and for all system states if relevant. As an example, if a system includes amplifiers with several gain states, the uncertainty analysis can be performed on data obtained for all possible gain states.

8.4.15 *TR* – Measurement area truncation

This uncertainty spatial-average value is due to data truncation on the measurement region.

8.4.16 *DAQ* – Data acquisition

Field-probe readout electronics uncertainties shall be assessed for field probe readout electronics. All uncertainties related to the probe readout electronics, including the gain and linearity of the instrumentation amplifier, its loading effect on the probe, and accuracy of the signal conversion algorithm, shall be evaluated to estimate the maximum *psPD* uncertainty. One method to determine these uncertainty components is by replacing the field probe with an equivalent source having the same source impedance as the field probe under consideration according to the manufacturer's specifications for the probe. This is generally performed by the system manufacturer. Each uncertainty shall be converted to a standard uncertainty using normal probability distribution. The RSS value of these uncertainties shall then be used to determine the overall readout electronics uncertainty.

8.4.17 *SMP* – Sampling

The *psPD* distribution is estimated with the field reconstruction from the direct sampling of the field at a set of discrete points. If the sampling resolution is coarse compared to the gradients of the induced *psPD* distribution, the peak spatial-average can be inaccurate.

The evaluation of this uncertainty may be combined with the evaluation of the uncertainty of reconstruction algorithms.

The uncertainty is evaluated using a set of numerically generated vector field reference distributions covering the validation sources in Clause E.5.

Move each reference function over several points in the x and y directions surrounding the reference location. The points are specified for no larger than 1 mm resolution with respect to the centre point, extending half of the probe sensor resolution in both directions. The values are evaluated at the sampling resolution of the *psPD* measurement equipment. The values are input to the measurement system software which computes the peak-spatial average PD using the reconstruction algorithms as if they were actually measured. The resulting *sPD* values are compared with reference *psPD* values. Record the maximum deviation of the *sPD* value from the target. A rectangular probability distribution is assumed.

8.4.18 *REC* – Field reconstruction

The numerical techniques that are applied to reconstruct the power density distribution from the measured fields introduce errors. Their uncertainty should be estimated.

A set of numerical reference E-field or H-field 3D distributions per frequency (see the analytical reference function in Clause E.5) is used.

- a) For each numerical distribution i , the peak spatial average PD is determined on the measurement region. This gives the reference value $psPD_{ref,i}$.

- b) The peak spatial-average $psPD_i$ on the measurement region is computed based on the i -th reference 3D field distribution. The same reconstruction algorithm as used for the measurements should be employed.
- c) For each distribution, the relative difference $(psPD_i - psPD_{ref,i}) / psPD_{ref,i}$ is computed.
- d) The uncertainty is estimated for the maximum relative difference across the applicable frequency range calculated over the relative differences on the i cases. A rectangular distribution is assumed.

8.4.19 SNR – Signal-to-noise ratio

The applied evaluation method is sensitive to the signal-to-noise ratio. The minimal signal-to-noise ratio (SNR) shall be specified for which the uncertainty is determined. The uncertainty budget is consequently only valid for signals larger than SNR .

A set of numerical reference E-field or H-field 3D distributions per frequency (e.g. the validation sources of Annex B) is used.

- a) For each numerical distribution i , the peak spatial average $psPD$ is determined on the measurement region. This gives the reference value $psPD_{ref,i}$.
- b) The peak spatial-average $psPD_i$ on the measurement region is computed using simulated measurement input data with added complex Gaussian noise (amplitude and phase). The same reconstruction algorithm as used for the measurements should be employed.
- c) Repeat step b) for 20 times.
- d) For each distribution, determine the standard deviation of the relative difference $(psPD_i - psPD_{ref,i}) / psPD_{ref,i}$.
- e) The uncertainty is estimated for the maximum standard deviation. A normal distribution is assumed.

8.4.20 TRA – Forward transformation and backward transformation

This uncertainty term describes the errors due to the transformation of the power density from the measurement region to the evaluation surface. Backward transformation or forward transformation may be used.

A set of analytical reference functions described in Clause E.5 containing E-field or H-field 3D distributions per frequency (the considered set of frequencies is the same as or within 100 MHz of the one used for system validation) is used.

- a) For each numerical distribution i , the $psPD$ is determined on the measurement region. The field distribution used as input to the algorithm should be chosen based on the minimum measurement separation distance in the user manual. This gives the reference value $psPD_{ref,i}$.
- b) The peak spatial-average $psPD_{ref,i,j}$ on the j -th surface is computed based on transforming each of the $psPD_{ref,i}$. The same forward and backward transformation algorithms as used for the measurements should be employed. If the method is based on propagation or backward transformation, if a phaseless technique is employed, only the amplitude of the field should be considered.
- c) For each (i, j) pair, the relative difference $(psPD_{i,j} - psPD_{ref,i,j}) / psPD_{ref,i,j}$ is computed.
- d) The uncertainty is estimated as the maximum RMS value across the applicable frequency range calculated over the relative differences on the $I \times J$ cases. A normal distribution is assumed.

8.4.21 SCA – Power density scaling

This is the uncertainty in the power density scaling procedure of 7.4.3. The ratio R_p is used to determine the $psPD$ from a DUT based on measurements made with the device transmitting a different modulation and/or power. If the modulation envelopes of the two modes are the same this error corresponds to the linearity of the power measurement device used. Where the modulation envelopes are different, the effect on the sensitivity of the power meter shall also be included.

The uncertainty may be evaluated by measuring the $psPD$ from the DUT at the location of the spatial peak PD in both modes and/or power levels and comparing the ratio obtained with R_p . In this case a rectangular probability distribution should be used.

8.4.22 SAV – Spatial averaging

The spatial averaging uncertainty is the uncertainty in procedure 7.4.2. The power density shall be averaged on the evaluation surface over the averaging area A_{av} after field reconstruction. This uncertainty term is due to deviations in the area, shape, and orientation of the averaging area from that specified in the exposure standards. Use the evaluation surfaces and validation sources in Annex A and Annex B to determine the uncertainty.

8.4.23 COM – Exposure combining

When exposure combining is used to determine the total exposure ratio, TER (see 7.5), the uncertainty of the TER is the root-sum-squared of the individual $psSAR$ and/or $psPD$ values.

The TER is the highest exposure across all points r on the evaluation surface according to Formula (27) in 7.5.2.

The uncertainty of the TER , U_{TER} is therefore given as the root sum squared of the uncertainties of the $psSAR$ evaluation at each frequency, $U_{psSAR}(f_n)$, and the uncertainties of the $psPD$ evaluations at each frequency, $U_{psPD}(f_m)$, according to Formula (32):

$$U_{TER} = \sqrt{\sum_{n=1}^N [U_{psSAR}(f_n)]^2 + \sum_{m=1}^M [U_{psPD}(f_m)]^2} \quad (32)$$

8.5 Uncertainty terms dependent on the DUT and environmental factors

8.5.1 PC – Probe coupling with DUT

The field probe can partially scatter the impinging power radiated by the DUT. In addition to causing multiple reflections (see 6.2), the modification of the DUT loading causes a reaction of the power amplifier that might adjust its output power. This uncertainty term is evaluated as the difference between the transmission coefficient of the DUT, $T = [1 - S_{11}^2]$, with and without the presence of the probe, where S_{11} is the magnitude of the reflection coefficient of the antenna.

The effect of multiple reflections is addressed in 8.4.7. This subclause applies to the second type of impact relating to a modification of the DUT behaviour. The following procedure shall be applied.

- Connect validation source or a set of reference sources to port 1 of a VNA using RF coaxial cable.
- Measure the magnitude of S_{11} of the sources in the applicable frequency range without the presence of the probe.
- Measure the magnitude of S_{11} of the sources in the same conditions with the probe.

d) For each source and test position, use Formula (33)

$$P_{\text{mismatch}} = \left| 1 - \frac{1 - |S_{11, \text{with probe}}|^2}{1 - |S_{11, \text{without probe}}|^2} \right| \quad (33)$$

and the relative standard deviation of P_{mismatch} across the applicable test conditions.

e) Report the maximum between standard deviations calculated according to d) as the PD measurement uncertainty contribution with assumed normal distribution.

The reported uncertainty following this approach can overestimate the actual uncertainty. Indeed, power amplifiers of modern DUTs are usually designed to compensate for different loadings such that the PA will usually apply more power when its output impedance gets away from the optimal load-pull zone, and less power when the matching is better. Calibration uncertainty shall be assessed and documented by the system manufacturer.

8.5.2 MOD – Modulation response

This uncertainty term might be relevant only for certain types of systems (e.g. those using diode-loaded probes). It can be assessed by using any source with a setup equal or equivalent to a setup used for system verification. The signal generation setup simulates the modulation for which the uncertainty is determined according to the specification of the communication system standard. The PD is measured with the modulated signal and with CW at the same RMS power (verification that the power meter is a true RMS detector, and that the amplifier is sufficiently linear for the entire dynamic range of the signal is required).

Formula (34) may be used to derive the modulation uncertainty for the particular modulation mod_X .

$$PD_{modX, \text{unc.}} [\%] = \max_j \left\{ \max_{PD(P_i)_{modX, j} = PD_h}^{PD(P_i)_{modX, j} = PD_l} \left(100 \% \times \left| \frac{PD(P_i)_{modX, j}}{PD(P_i)_{CW, j}} - 1 \right| \right) \right\} \quad (34)$$

Here, $PD(P_i)_{CW, j}$ is the power density measured for a CW signal at the i -th power level P_i , $PD_l = 0,5 \text{ W/m}^2$, and $PD_h = 500 \text{ W/m}^2$. $PD(P_i)_{modX, j}$ is the corresponding value for the modulated signal. The index j refers to the probe sensor, for each of which the procedure shall be repeated.

The power density uncertainty is determined as the maximum of all PD_{modX} at each step. A rectangular probability distribution is assumed for probe modulation response uncertainty.

8.5.3 IT – Integration time

Measurement integration-time uncertainties can arise when test devices do not emit a continuous signal. When the integration time and discrete sampling intervals used in the probe electronics are not synchronized with the pulsed characteristics of the measured signal, the RF energy at each measurement location might not be fully or correctly captured.

The probe integration time should be determined from PD measurements using a stable source with the same signal characteristics and the same field probe type that is used for DUT measurements. Measurements at a single point (where the PD is at least 5 W/m^2) shall be made consecutively using the chosen integration time and progressively larger integration times. The integration time shall be doubled for each consecutive measurement until the last and next to last measurements are within 0,5 % of each other. Each measurement at a given integration time shall be repeated several times to verify that the measurement result is stable, and the average PD of the repeat measurements shall be used for that integration time. For the probe integration time, a rectangular probability distribution shall be assumed. The uncertainty is the percentage difference between the average PD at the chosen integration time and the average PD at the longest integration time.

8.5.4 *RT* – Response time

Field probe signal response time uncertainty is evaluated by exposing the field probe to a field step response producing an equivalent power density of at least 10 W/m^2 . The signal response time is evaluated as the time required by the field probe and its readout electronics to reach 90 % of the expected final value produced by the step response by switching the RF power on and off. During the *psPD* measurement, the field probe shall remain stationary at each measurement location for at least twice the assessed response time so that the field probe signal response time uncertainty is negligible. Under these measurement conditions, a tolerance value of zero may be entered. Otherwise, the response time uncertainty shall be assessed, using the signal characteristics of the test device. In this case, the signal step-response time uncertainty is equal to the percentage difference between the *psPD* at the chosen measurement time and the *psPD* measured at twice the chosen measurement time. A rectangular probability distribution shall be assumed.

8.5.5 *DH* – Device holder influence

This is the influence of the device holder on the measurement uncertainty. This depends on the DUT. The error shall be assessed by performing *psPD* measurements with the DUT: a) in the device holder, and b) supported by a polystyrene block. A device holder uncertainty can be generalized to apply to a certain device type provided that the variability between a sample of at least six of devices of this type is assessed and an additional Type A uncertainty term is added to account for this variability.

8.5.6 *DA* – DUT alignment

The coordinate system for the DUT can allow accurate positioning with mechanical or optical references. This uncertainty term is determined by evaluating the PD for different mechanical tolerances in the DUT position, based on the procedures used to align the DUT coordinates with the reference coordinates.

The DUT alignment uncertainty is the maximum deviation in PD between the perfectly aligned DUT and the misaligned DUT. The translation of the maximum alignment uncertainty in x , y , z (in millimetres) into PD uncertainty shall be provided by the manufacturer. This uncertainty term has a rectangular distribution.

8.5.7 *AC* – RF ambient conditions

The ambient RF level is evaluated by performing PD measurements using the same equipment setup as used for testing the DUT, but with the RF power switched off.

8.5.8 *TEM* – Laboratory temperature

The influence of laboratory temperature on the measurement of PD shall be evaluated. It is recommended to repeat the relative system check at one frequency for laboratory temperatures between 18°C and 25°C . Apply a rectangular probability distribution to this uncertainty term.

8.5.9 REF – Reflections in laboratory

This uncertainty term is the maximum error in PD due to reflecting objects in the laboratory (e.g. conducting or dielectric objects) compared to the PD in the absence of any reflecting objects. In practice, it is difficult to remove all reflecting objects, because some of them are necessary for the measurement system. However, mitigation techniques such as the placement of absorbing materials and ferrites in the laboratory can be used to evaluate the removal of reflecting objects.

To evaluate the influence of laboratory reflections, perform a set of relative system checks (see 7.2.1) for the standard setup (without mitigation techniques) and with mitigation applied. The uncertainty is the maximum deviation, with a rectangular probability distribution.

8.5.10 MSI – Measurement system immunity/secondary reception

During measurement, the field radiated by the DUT might be picked up by parts of the measurement system other than the probe sensors. This can result in undesirable effects susceptible to increase the measurement uncertainty. It may be performed, for example, by using the validation sources in specified test positions and blocking the direct field reception from the probe supposed to perform the measurement. PD measurements should be performed in these conditions at frequencies specified for the validation.

8.5.11 DRI – DUT drift

The DUT drift is accounted for by the first and last steps of the measurement processes specified in 7.4.2. See also 7.4.4 for correction for DUT drift. The DUT drift (*DRI*) is recorded as the percentage difference of the secondary reference measurement, $Ref_{\text{secondary}}$, from the primary reference measurement, Ref_{primary} , according to Formula (35):

$$DRI = 100 \% \times \frac{Ref_{\text{secondary}} - Ref_{\text{primary}}}{Ref_{\text{primary}}} \quad (35)$$

8.6 Combined and expanded uncertainty

The contributions of each component of uncertainty should be recorded with description, probability distribution, sensitivity coefficient, c_i , and uncertainty value $u(x_i)$ of the uncertainty component x_i . A recommended tabular form is shown in Table 3. The expanded uncertainty shall be expressed either in percent if it has a normal distribution or in decibel (dB) if it has a log-normal distribution, as reported by the system manufacturer.

If all uncertainty components x_i are statistically independent, the combined standard uncertainty u_c for spatial-average PD measurement shall be estimated according to Formula (36):

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 \times u^2(x_i)} \quad (36)$$

If some uncertainty components are statistically dependent on others, the general Formula (37) can be applied to calculate the combined standard uncertainty:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j)} \quad (37)$$

In Formula (37), $r(x_i, x_j)$ is the correlation coefficient that is calculated according to Formula (38) from the estimated covariance $u(x_i, x_j)$ associated with the two components x_i and x_j .

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \quad (38)$$

In the special case where all uncertainty terms are completely correlated (i.e. $r(x_i, x_j) = 1$), the uncertainty is a linear sum of the individual components according to Formula (39):

$$u_c(y) = \sum_{i=1}^m c_i \times u(x_i) \quad (39)$$

Further description and examples of evaluating uncertainty are provided in ISO/IEC Guide 98-1 [19].

The expanded uncertainty U is estimated by multiplying the standard uncertainty by a coverage factor of k representing a confidence interval of 95 %. The coverage factor is $k = 2$ if the combined uncertainty has a Gaussian distribution. Otherwise, see ISO/IEC Guide 98-1 [19] for more information.

The evaluation of several uncertainty components can be combined and assessed directly by Monte-Carlo-method or other methods. In such a case the calculation of the correlation coefficient might not be needed.

Table 3 – Template of measurement uncertainty for power density measurements

Symbol	Source of uncertainty	Description	Unc. ± dB	Prob. Dist.	Div.	c_i	Standard uncertainty ± dB	v_i or v_{eff}
Uncertainty terms dependent on the measurement system								
<i>CAL</i>	Calibration	(8.4.1)						
<i>COR</i>	Probe correction	(8.4.2)						
<i>FRS</i>	Frequency response	(8.4.3)						
<i>SCC</i>	Sensor cross coupling	(8.4.4)						
<i>ISO</i>	Isotropy	(8.4.5)						
<i>LIN</i>	System linearity error	(8.4.6)						
<i>PSC</i>	Probe scattering	(8.4.7)						
<i>PPO</i>	Probe positioning offset	(8.4.8)						
<i>PPR</i>	Probe positioning repeatability	(8.4.9)						
<i>SMO</i>	Sensor mechanical offset	(8.4.10)						
<i>PSR</i>	Probe spatial resolution	(8.4.11)						
<i>FLD</i>	Field impedance dependence	(8.4.12)						
<i>MED</i>	Measurement drift	(8.4.13)						
<i>APN</i>	Amplitude and phase noise	(8.4.14)						
<i>TR</i>	Measurement area truncation	(8.4.15)						
<i>DAQ</i>	Data acquisition	(8.4.16)						
<i>SMP</i>	Sampling	(8.4.17)						
<i>REC</i>	Field reconstruction	(8.4.18)						

Symbol	Source of uncertainty	Description	Unc. $\pm$ dB	Prob. Dist.	Div.	c_i	Standard uncertainty $\pm$ dB	v_i or v_{eff}
<i>SNR</i>	Signal-to-noise ratio	(8.4.19)						
<i>TRA</i>	Forward and backward transformation	(8.4.20)						
<i>SCA</i>	Power density scaling	(8.4.21)						
<i>SAV</i>	Spatial averaging	(8.4.22)						
<i>COM</i>	Exposure combining	(8.4.23)						
Uncertainty terms dependent on the DUT and environmental factors								
<i>PC</i>	Probe coupling with DUT	(8.5.1)						
<i>MOD</i>	Modulation response	(8.5.2)						
<i>IT</i>	Integration time	(8.5.3)						
<i>RT</i>	Response time	(8.5.4)						
<i>DH</i>	Device holder influence	(8.5.5)						
<i>DA</i>	DUT alignment	(8.5.6)						
<i>AC</i>	RF ambient conditions	(8.5.7)						
<i>TEM</i>	Laboratory temperature	(8.5.8)						
<i>REF</i>	Reflections in laboratory	(8.5.9)						
<i>MSI</i>	Immunity / secondary reception	(8.5.10)						
<i>DRI</i>	DUT drift	(8.5.11)						
	Combined standard uncertainty	(8.6)						
	Expanded uncertainty (95 % confidence interval)	(8.6)						

It is recommended to determine the reconstruction and forward/backward transformation directly using actually measured or simulated measured data such that uncertainty propagation and *SNR* are already considered

Table 4 – Example measurement uncertainty budget for power density measurement results

Symbol	Source of uncertainty	Description	Unc. $\pm$ dB	Prob. Dist.	Div.	c_i	Standard uncertainty $\pm$ dB	v_i or v_{eff}
Uncertainty terms dependent on the measurement system								
<i>CAL</i>	Calibration	(8.4.1)	0,49	N	1	1	0,49	∞
<i>COR</i>	Probe correction	(8.4.2)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>FRS</i>	Frequency response	(8.4.3)	0,2	R	$\sqrt{3}$	1	0,12	∞
<i>SCC</i>	Sensor cross coupling	(8.4.4)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>ISO</i>	Isotropy	(8.4.5)	0,5	R	$\sqrt{3}$	1	0,29	∞
<i>LIN</i>	System linearity error	(8.4.6)	0,2	R	$\sqrt{3}$	1	0,12	∞
<i>PSC</i>	Probe scattering	(8.4.7)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>PPO</i>	Probe positioning offset	(8.4.8)	0,3	R	$\sqrt{3}$	1	0,17	∞
<i>PPR</i>	Probe positioning repeatability	(8.4.9)	0,04	N	1	1	0,02	∞
<i>SMO</i>	Sensor mechanical offset	(8.4.10)	0	N	1	1	0	∞
<i>PSR</i>	Probe spatial resolution	(8.4.11)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>FLD</i>	Field impedance dependence	(8.4.12)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>MED</i>	Measurement drift	(8.4.13)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>APN</i>	Amplitude and phase noise	(8.4.14)	0,03	N	1	1	0,03	∞
<i>TR</i>	Measurement area truncation	(8.4.15)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>DAQ</i>	Data acquisition	(8.4.16)	0,03	N	1	1	0,02	∞
<i>SMP</i>	Sampling	(8.4.17)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>REC</i>	Field reconstruction	(8.4.18)	0,6	R	$\sqrt{3}$	1	0,35	∞
<i>SNR</i>	Signal-to-noise ratio	(8.4.19)	0,04	N	1	1	0,2	
<i>TRA</i>	Forward and backward transformation	(8.4.20)	0,5	N	1	1	0,29	∞
<i>SCA</i>	Power density scaling	(8.4.21)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>SAV</i>	Spatial averaging	(8.4.22)	0,1	R	$\sqrt{3}$	1	0,06	∞
<i>COM</i>	Exposure combining	(8.4.23)	0,2	R	$\sqrt{3}$	1	0,12	∞
Uncertainty terms dependent on the DUT and environmental factors								
<i>PC</i>	Probe coupling with DUT	(8.5.1)	0	N	1	1	0	∞
<i>MOD</i>	Modulation response	(8.5.2)	0,4	R	$\sqrt{3}$	1	0,23	∞
<i>IT</i>	Integration time	(8.5.3)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>RT</i>	Response time	(8.5.4)	0,1	R	$\sqrt{3}$	1	0,06	∞
<i>DH</i>	Device holder influence	(8.5.5)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>DA</i>	DUT alignment	(8.5.6)	0,04	R	$\sqrt{3}$	1	0,02	∞

Symbol	Source of uncertainty	Description	Unc. $\pm$ dB	Prob. Dist.	Div.	c_i	Standard uncertainty $\pm$ dB	v_i or v_{eff}
<i>AC</i>	RF ambient conditions	(8.5.7)	0,04	R	$\sqrt{3}$	1	0,02	∞
<i>TEM</i>	Laboratory temperature	(8.5.8)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>REF</i>	Reflections in laboratory	(8.5.9)	0,1	R	$\sqrt{3}$	1	0,06	∞
<i>MSI</i>	Immunity / secondary reception	(8.5.10)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>DRI</i>	DUT drift	(8.5.11)	0,1	R	$\sqrt{3}$	1	0,06	∞
	Combined standard uncertainty	(8.6)					0,85	
	Expanded uncertainty (95 % confidence interval)	(8.6)					1,70	
NOTE All values were assessed using non-statistical methods (Method B of [18], [19]) in which v_i can be considered infinite.								
N – normal probability distribution; R – rectangular probability distribution								

9 Measurement report

9.1 General

All test results shall be recorded in a measurement report, and shall include all the information necessary for the interpretation of the power density measurement results.

A measurement report shall include at minimum the items listed in 9.2 to demonstrate conformity with the requirements of this document.

NOTE 1 Some measurement system operating information might be deemed proprietary and confidential. This information can be made available in the form of confidential documents accompanying a measurement report.

NOTE 2 Annex G provides measurement report example.

9.2 Items to be recorded in measurement reports

All of the information needed for performing repeatable tests, calculations, and measurements, giving results within the required calibration and uncertainty limits, shall be recorded. Measurement reports shall include the following.

a) General introduction.

- 1) Identification of the test laboratory.
- 2) Identification of the DUT including hardware and software revision numbers, serial number, e.g. IMEI (international mobile equipment identity).
- 3) Conformity requirements, e.g. test standards, guidelines, recommendations, etc.
- 4) Exposure limits applicable, e.g. ICNIRP [2], IEEE Std C95.1 [3].
- 5) A list of any accreditations provided by national or international bodies to perform conformity testing against these standards. This shall include the date of expiry.

b) Measurement system.

- 1) Measurement system main component description including probe, readout electronics, device holder and any other relevant components. Rationale and description of measurement system parameter settings when directly affecting the results.
- 2) For the probe(s) used, include

- i) dimensions,
 - ii) isotropy,
 - iii) spatial resolutions,
 - iv) dynamic range, and
 - v) linearity error.
- 3) Calibration data for relevant components.
- 4) Description of the post-processing algorithm.
- 5) Environmental conditions (e.g. temperature).
- 6) Results of relative system check:
 - i) measurement results for each frequency band;
 - ii) deviation from the PD target value;
 - iii) radiating source description.
- 7) Results of absolute system check (if required according to Annex A):
 - i) measurement results for each frequency band;
 - ii) deviation from the PD target value;
 - iii) radiating source description.
- c) Uncertainty estimations for relative system check, absolute system check, system validation.
 - 1) To include measurement uncertainty values from Clause 8 and Annex C.
 - 2) Any other relevant items.
- d) Device and test details.
 - 1) Description of the form factor of the DUT and a brief description of its intended function. Where appropriate, external photos and internal photos should be provided.
 - 2) Description of the positions and orientations tested, including photos and/or graphics both wide angle and close-up showing the DUT positioning relative to the evaluation surface.
 - 3) Description of the available and tested antenna(s) and accessories, including batteries. Where needed, schematic drawings should be included and show a level of detail that represents functional elements relevant to the antenna. Circuit board details are not necessary unless they refer to antenna.
 - 4) Description of the available and tested operating modes, power levels and frequency bands.
 - 5) Rationale for any test reductions (e.g. fast scanning, operation modes, etc.).
 - 6) Description and rationale for selected approach on finding maximum exposure cases among the antenna configurations (7.3.1, step 4)).
 - 7) Results of all tests performed ($psPD$ value for each test, and graphical representation of the coarse scans with respect to the device for the maximum PD value of each operating mode) and details on scaling of the results.
 - 8) All relevant setup parameters and configuration details.
 - 9) Information on the configuration used for the $psPD$, including justification that this represents the maximum exposure.
 - 10) Information on the exposure combining performed (7.5), if any.
- e) The measurement report shall include the following information pertaining to the validation of the PD measurement method.
 - 1) Description of the validation procedure(s).
 - 2) Results of the computations, measurements and/or other assessments performed by the method developer in order to validate the PD measurement method.

- 3) Additional analyses or conditions imposed by the method developer and applied by the user to satisfy the PD measurement method if applicable.
 - 4) Radiating source description and PD distribution for each frequency band.
 - 5) Range of operating frequencies, modulations, device operating configurations, exposure conditions and PD distributions for each frequency band specific to the method.
 - 6) PD uncertainty.
- f) Report summary.
- 1) Frequency bands and configurations.
 - 2) List of all frequency bands and modulations tested.
 - 3) List of all test configurations assessed.
 - 4) Tabulated PD values over the testing positions, bands, operating modes and device configurations.
 - 5) Tabular and graphical results for the highest $psPD$ measurement for each frequency band and modulation.
 - 6) Results of all PD tests performed as a result of 7.4, which include the $psPD$ value for each required test and graphical representation of the scans with respect to the device.
 - 7) The values related to the conditions of Formula (14) (see 7.3.2) through Formula (27) (see 7.5.2).
 - 8) Reference to exposure limits and a statement of conformity, or otherwise exposure limits and conformity statement.
- g) Where proprietary information has been used to determine the test configurations, included or excluded, this shall be cited. A brief description of the information that was used, e.g. table of phases and amplitudes relevant for beam forming antennas, should be included.
- h) Proximity sensors reporting.
- When proximity sensors have been triggered during the testing, the relevant reporting requirements of 9.2 of IEC/IEEE 62209-1528:2020 should be followed.
- i) Time-period averaging reporting.
- When time-period averaging is implemented, the relevant reporting requirements of 9.2 of IEC/IEEE 62209-1528:2020 should be followed.

Annex A (normative)

Measurement system check and system validation tests

A.1 Overview

The goal of this Annex A is to specify the relative system check, absolute system check and system validation procedures that enable users and third parties to verify power density system performance by applying consistent protocols. The purposes of these three procedures are as follows.

- a) Relative system check is a fast and reliable test method that can be applied routinely to check that the PD system is operational with no system component failure and has not degenerated since the last absolute system check or system validation. The objective here is to ascertain that the PD system is acceptable for testing at the operating frequencies of the DUT. This test requires a system check antenna (e.g. a pyramidal horn antenna as described in Annex B, or other antenna proposed by the system manufacturer).
- b) Absolute system check is a fast and reliable test method for the test laboratory to ensure that the PD system provides absolute accuracy for a specific source within its specification. It can be performed after installation of the system to verify that the performance did not degrade during shipment or installation at the test laboratory. This test requires a radiating antenna that has a traceable absolute target value. This test is not a replacement of system validation.

NOTE 1 Absolute system check and relative system check are the same procedure if the relative system check uses an antenna with a traceable absolute target value.

- c) System validation demonstrates the accuracy of the system and its components against the intended use specifications. The system validation is an assurance that the system provides results within the specified uncertainty when all components are operating within their specifications. This test is performed on a system level and is typically performed by the system manufacturer but is sufficiently specified to be performed by the user of the system. The system validation shall be performed on a calibrated system, every time hardware and/or software modifications are made that might impact the PD assessment (e.g. modifications to the probe(s), reconstruction algorithms, or readout electronics, and calibration of system components). The test setup consists of the system validation antennas described in Annex B, each having a valid calibration certificate.

NOTE 2 After the system validation performed in the test laboratory passes the acceptance criteria, the test laboratory can establish the $psPD$ reference value of the system check antenna used for relative system check by measuring the relative antenna immediately after successful validation of the system. The measured $psPD$ becomes the new reference value.

NOTE 3 If the system has been validated by manufacturer prior to shipment, an absolute system check needs to be performed. After the absolute system check passes the acceptance criteria, the test laboratory can establish the $psPD$ reference value of the system check antenna used for relative system check by measuring the relative system check antenna immediately after the absolute system check had been successfully completed.

NOTE 4 In this document, validation is performed on a flat evaluation surface. Validation methods on curved evaluation surfaces (e.g. modified SAM) are not addressed in this document, and will be considered for an amendment.

A.2 Normalization to total radiated power

A.2.1 General

The power density is normalized to the total radiated power (TRP). At millimetre-wave frequencies, ohmic losses of the antenna can be significant and shall be accounted for. This is done either by measuring the TRP directly (see A.2.3) or by measuring the accepted power and multiplying by the radiation efficiency (see A.2.2). The measurements specified in this Annex A require accurately measured and stable power to the antenna. A.2.2 and A.2.3 describe two options to determine the TRP. Option 1 is a determination of the total radiated power from the accepted power and accounting for the ohmic antenna losses. Option 2 is the direct measurement of the TRP.

If the generator, amplifier and antenna of the absolute system check source comprise a single unit and the TRP has a traceable calibration, Option 1 or Option 2 does not need to be performed by the user; however, the procedure described in Clause A.5 shall be documented by the antenna manufacturer.

A.2.2 Option 1: Accepted power measurement

A.2.2.1 Procedure

TRP can be determined by measuring and monitoring the forward and reflected power at the RF input of the reference antenna. Ohmic losses shall also be determined as described at the end of this subclause.

A recommended test setup is shown in Figure A.1. The system includes a signal generator, a frequency multiplier, amplifier (Amp.), 3 dB to 20 dB attenuators (Att), a bidirectional coupler, power meters (PM), a matched load, a precision short, cables or waveguides, connectors and adaptors. A bandpass filter is needed if higher harmonics content might distort the results.

- a) Connect the equipment as shown in Figure A.2. A power meter PM1 and attenuator Att1 are connected to the end of the cable or the waveguide. Connect a load at the reverse coupled port of the directional coupler. Ensure that the measured power is stable over time. Adjust the power output from the signal generator until the forward power P_f at PM1 is at the desired power level, and measure the forward coupled power P_{fc} at PM2.
- b) Next, connect the equipment as shown in Figure A.3, with the short termination connected to the end of the cable. Adjust the power from the signal generator such that the forward coupled power at PM2 is equal to the previously measured forward coupled power, P_{fc} , and read the shorted reverse coupled power P_{rcs} at PM1.
- c) Connect the equipment as shown in Figure A.4, with the reference antenna (positioned at the test location) connected to the end of the cable. Adjust the power from the signal generator such that the forward coupled power at PM2 is equal to the previously measured forward coupled power, P_{fc} , and read the reverse coupled power P_{rc} at PM1.

The return loss of the reference antenna (RL) in decibel is $P_{rcs} - P_{rc}$.

- d) Calculate the accepted power (i.e. power received by the reference antenna) by subtracting the return loss (RL) from the forward power P_f . The insertion loss shall also be subtracted if there is a transmission line (cable or waveguide) between the reference point and the antenna. The insertion loss can be measured with a vector network analyser.
- e) TRP is calculated by multiplying the accepted power by the radiation efficiency (see 3.5.9). The radiation efficiency takes into account ohmic losses in the antenna. The radiation efficiency can be measured with an antenna test range, or it can be read from the documentation of antenna manufacturer. If the antenna manufacturer documents the radiation efficiency, it shall also document the uncertainty of this value, u_{power} , to be used in Clause A.3, Clause A.4, and Clause A.5.

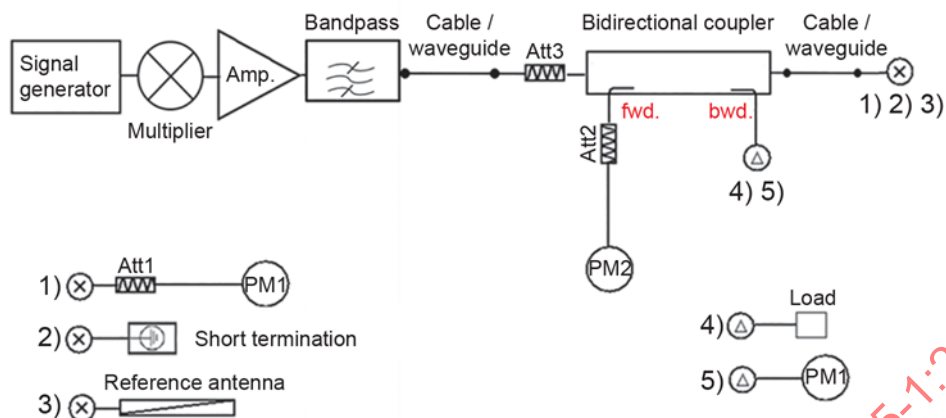


Figure A.1 – Recommended accepted power measurement setup for relative system check, absolute system check and system validation

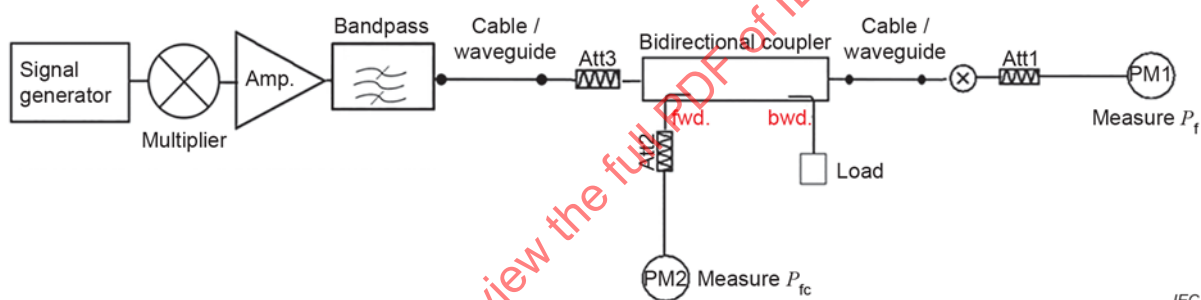


Figure A.2 – Equipment setup for measurement of forward power P_f and forward coupled power P_{fc}

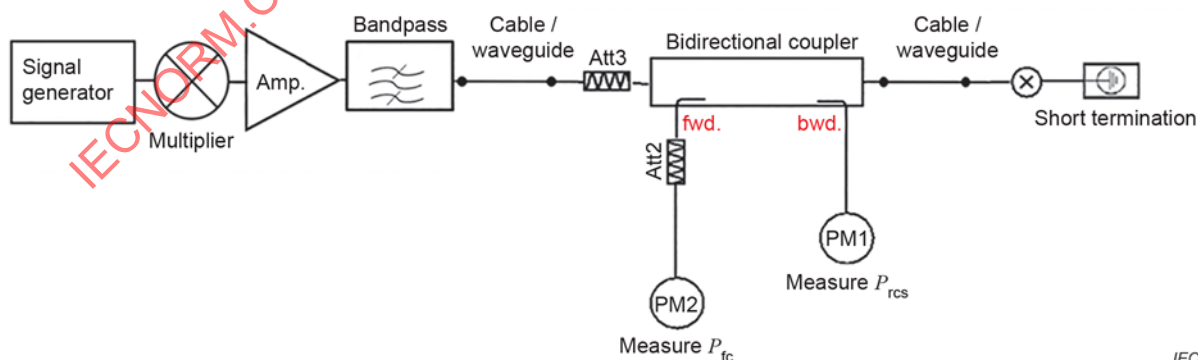


Figure A.3 – Equipment setup for measuring the shorted reverse coupled power P_{rcs}

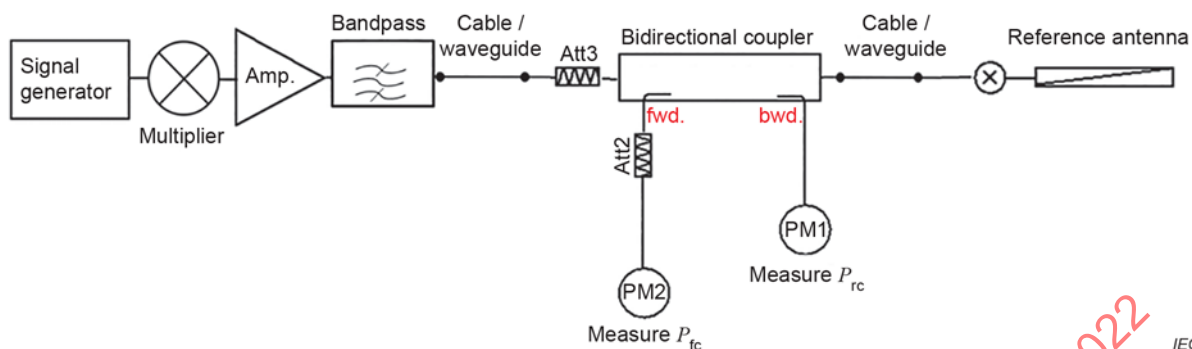


Figure A.4 – Equipment setup for measuring the power with the reference antenna

A.2.2.2 Uncertainty assessment

Figure A.2 describes the power measurement setup used to determine accepted power (P_{acc}) at the end of the cable, used in Option 1. P_f is measured by PM1 and related to the forward coupled power (P_{fc}) measured by PM2. Return loss of the reference antenna (RL) is determined by the power measurement setup shown in Figure A.3, where the shorted reverse coupled power (P_{rcs}) is measured at the reverse power port of the directional coupler by PM1. When the reference antenna is connected to the cable as shown in Figure A.4, the reverse coupled power (P_{rc}) is measured by PM1. The uncertainty contributions for P_f , P_{fc} , P_{rc} and P_{rcs} are as follows.

a) The contributors to $u_{p_{acc}}$ are: $u_1(\text{PM1})$, $u_1(\text{cable})$, $u_1(\text{Att1})$, $u_1(\Gamma_{GE}, \Gamma_e, RL)$, where:

- $u_1(\text{PM1})$ is dependent on instrument accuracy, sensor linearity, noise, zero setting, zero drift, calibration factor, reference power accuracy, reference power mismatch;
- $u_1(\text{cable})$ is the maximum deviation resulting from cable movement (rectangular distribution);
- $u_1(\text{attenuator})$ is the uncertainty on the attenuator value;
- $u_1(\Gamma_{GE}, \Gamma_e, RL)$ is the uncertainty of the equivalent source reflection, reflection coefficient of the PM1 power sensor with attenuator Att1 and reflection coefficient of the reference antenna.

NOTE The uncertainty of the attenuator can be excluded if both the power meter PM1 and attenuator Att1 are calibrated together.

b) The contributors to P_{fc} : no uncertainty, because the signal generator output is adjusted to maintain an exact constant value for P_f at the output of the cable (reference plane).

c) The contributors to P_{rc} , P_{rcs} are: $u_2(\text{PM1})$, $2 \times u_1(\text{cable})$, where:

- $u_2(\text{PM1})$ is dependent on instrument accuracy, sensor linearity, noise, zero setting, zero drift, calibration factor, reference power accuracy, reference power mismatch.

d) Uncertainty by approximation: $u_1(F)$, this contributor is included if the measurement method with bidirectional coupler is used (the mismatch is included in this uncertainty) without VNA.

- e) Mismatch uncertainty $u_1(\Gamma_{GE}, \Gamma_e, RL)$, this contributor is included if a measurement method with directional coupler and a VNA (for the RL measurement) is used, where:

Γ_{GE} is the equivalent source reflection (Formula (A.1)) when a directional coupler is used:

$$\Gamma_{GE} = \frac{S_{32} + S_{21}}{S_{31}} - S_{22} \quad (A.1)$$

The S parameters (S_{31} , S_{21} , S_{32} , S_{22}) for the 4-port directional coupler (illustrated in Figure A.5) can be obtained from manufacturer specifications, or measured with a VNA.

- f) $u_1(\Gamma_{GE}, \Gamma_e, RL)$ is expressed in Formula (A.2):

$$u_1(\Gamma_{GE}, \Gamma_e, RL) = \sqrt{2} \times \Gamma_{GE} \times \sqrt{|\Gamma_e|^2 + |RL|^2} \quad (A.2)$$

where

Γ_e is the reflection coefficient of the PM1 power sensor with attenuator Att1;

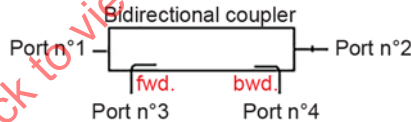
Γ_{GE} is the equivalent source reflection;

RL is the reflection coefficient of the reference antenna.

- g) u_{p_acc} is expressed according to Formula (A.3):

$$u_{p_acc} = \sqrt{u_1(\text{PM1})^2 + u_1(\text{attenuator})^2 + u_1(\text{cable})^2 + u_2(\text{PM1})^2 + u_1(\Gamma_{GE}, \Gamma_e, RL)^2} \quad (A.3)$$

Example of power measurement uncertainty is displayed in Table A.1.



IEC

Figure A.5 – Port numbering for the S-parameter measurements of the directional coupler

Table A.1 – Example of power measurement uncertainty

Symbol	Uncertainty source X_i	Prob. Dist. ^a	Uncertainty	q Divisor ^a	$u(X_i)$	c_i	$u_i(v) = c \times u(X_i)$	Degree of freedom (v_i)
Contributors to P_f								
$u_{\text{abs}}(\text{PM1})$	Uncertainty of absolute measurement with PM1	N		1		1		
$u(\text{attenuator})$	Uncertainty in S_{21} of Att1	N		1		1		
$u(\text{cable or waveguide})$	Uncertainty by cable flexion or waveguide loss and mismatch	R		$\sqrt{3}$		1		
Contributors to P_{rc} and P_{rcs}								
$u_{\text{rel}}(\text{PM1})$	Uncertainty of relative measurement with PM1	N		1		1		
$u(\Gamma_{\text{GE}}, \Gamma_e, RL)$	Mismatch error uncertainty	U		$\sqrt{2}$		1		
Total accepted power measurement uncertainty ($k = 1$)								Effective degrees of freedom (v_{eff})
Expanded accepted power measurement uncertainty ($k = 2$)								Effective degrees of freedom (v_{eff})
N – normal probability distribution; R – rectangular probability distribution; U – U-shaped probability distribution								
^a Probability distributions and divisors are chosen to best represent available knowledge of the quantities concerned.								

A.2.3 Option 2: Total radiated power measurement

Measurement of total radiated power (TRP) is an alternative to Option 1 (see A.2.2).

TRP is the integral of the power pattern over the entire radiation sphere. It is determined from *EIRP* values sampled at a series of locations in the elevation plane and the azimuth plane of a reference antenna. Such TRP measurements generally have a rather large uncertainty; see, e.g. CTA [21].

To reduce the uncertainty, the TRP assessment can be performed at any distance (d_{TRP}) in the far-field of the antenna provided the relative 3D radiated field distribution at the measurement distance is known with high precision and known uncertainty (e.g. by simulations). The TRP is determined using the following steps:

- simulation of the TRP of the antenna $P_{\text{TRP, sim}}$;
- simulation of the field distribution (E or H) at distance d_{TRP} for an area larger than $4\lambda^2$ and determination of the $psPD_{\text{sim}}$ averaged over 4 cm^2 at d_{TRP} ;

- c) determination of the scaling factor s_{TRP} between the measured and simulated field distributions using a least-square algorithm while the field at any point shall deviate by less 0,5 dB when normalized to the peak field:

$$P_{\text{TRP,exp}} = s_{\text{TRP}} \times P_{\text{TRP,sim}}$$

A comprehensive uncertainty budget for the radiation pattern shall be determined and provided. The uncertainty cannot be better than the root-sum-square of the simulation, source validation, and measurements.

A.3 Relative system check

A.3.1 Purpose

Relative system check verifies the repeatability of a PD measurement system before conformity testing, and is not a validation of all system specifications. The relative system check detects unacceptable measurement errors or uncertainties in the system, such as:

- a) measurement system component failures;
- b) measurement drift;
- c) operator errors in measurement setup or software parameters;
- d) other possible adverse conditions in the system configuration and test environment, e.g. RF interference, temperature variation.

The relative system check is a 1 cm² and/or 4 cm² area-averaged *psPD* measurement with a system check antenna at one distance (e.g. an antenna in Annex B or antenna proposed by the system manufacturer). The system components, software settings and other system parameters shall be the same as those used for the conformity tests. The applied system settings (grid setting, reconstruction and/or forward and backward transformation, etc.) and calibration used in the relative system check shall be valid for the conformity test frequency. For example, if the probe calibration is valid over a broad frequency, it is sufficient to perform the relative system check at a frequency within the valid calibration band that also includes the conformity test frequency.

The relative system check shall be performed within a week before the PD evaluation and on the same PD measurement system that will be used for the evaluation of the DUT. The 1 cm² and/or 4 cm² target values are valid for a specific evaluation distance and may be either calibrated values or reference values for the specific antenna in the setup. The reference values either are taken from a calibration certificate or are measured by the laboratory immediately after the absolute system check is performed.

A.3.2 Antenna and test conditions

The evaluation surface shall be irradiated using a system check antenna designed for the required DUT operating frequency, transmitting within $\pm 15\%$ of the DUT operating frequency. The reference antennas used for relative system check may be one of the antennas described in Annex B, or another antenna specified by the laboratory or the system manufacturer.

The system check antenna shall be positioned so that power density can be evaluated on a surface where the target values are given, typically positioned parallel to the evaluation surface. The distance between the evaluation surface and the antenna, s , shall be set with precision ensuring the repeatability does not exceed the DUT alignment uncertainty (8.5.6).

The antenna return loss shall be measured at least annually using a network analyser or the setup in Figure A.1, to ensure low PD measurement uncertainty due to power reflection. Since the system check antennas are frequently used, they can be damaged (e.g. mechanical distortion or degradation of the input connector of the antenna); the system check antenna return loss shall be periodically verified by the user to avoid misinterpretation of relative system check results according to B.5.6.

A.3.3 Procedure

The relative system check procedure is as follows.

- Measure the $psPD$ of the system check antenna using the measurement procedure in Clause 7.
- Normalize the $psPD$ to 0 dBm TRP measured as in Clause A.2, Option 1 or Option 2.
- Compare the normalized $psPD$ to the target value.
- Apply the acceptance criteria described in A.3.4.

A.3.4 Acceptance criteria

Before starting DUT PD testing in any configuration, the acceptance criteria shall be met. The relative system check is successful if a) or b) is met:

- All absolute differences between the measured values, $psPD_{meas}$ and target values $psPD_{tgt}$, with $psPD$ values averaged over 1 cm^2 and/or 4 cm^2 , shall be within the combined uncertainty u_c of the measurement system and the source antenna, according to Formula (A.4) if the uncertainty is expressed in decibel, or according to Formula (A.5) if the uncertainty is expressed in percent, along with Formula (A.6).

$$\Delta psPD_{tgt} = \left| 10 \times \lg \left(\frac{psPD_{meas}}{psPD_{tgt}} \right) \right| < \min(2 \times |u_c|, 2 \text{ dB}) \quad (\text{A.4})$$

or

$$\Delta psPD_{tgt} = \left| \frac{psPD_{meas} - psPD_{tgt}}{psPD_{tgt}} \right| < \min(2 \times |u_c|, 58\%) \quad (\text{A.5})$$

$$u_c = \sqrt{u_{\text{antenna_cal}}^2 + u_{\text{power}}^2 + u_{\text{meas}}^2} \quad (\text{A.6})$$

where

- | | |
|---------------------------|--|
| $psPD_{tgt}$ | is the target value, derived from repeated measurement of source antenna, normalized to 0 dBm TRP ; |
| $u_{\text{antenna_cal}}$ | is the standard uncertainty ($k = 1$) of the $psPD$ of the antenna model; |
| u_{power} | is the standard uncertainty ($k = 1$) of the measured TRP (see Clause A.2); |
| u_{meas} | is the standard uncertainty ($k = 1$) of the $psPD$ measurement (probe calibration, electronics, and positioning). |

The deviation is limited to 2 dB (58 %) to facilitate good reproducibility of results from the measurement system and antenna. If the 2 dB criterion is not met, the measurement corresponding to the points that failed shall be repeated at least three times in order to preclude measurement outliers. If the standard deviation of the three measurements is higher than the measurement system repeatability, then the failure can come from the RF setup, the system-check antenna or the measurement system. If the standard deviation of the three measurements is within the measurement system repeatability, then a systematic error exists and can come from a drift of the system calibration or an incorrect RF setup.

- b) All relative differences between the measured values $psPD_{meas}$ and the reference values using the same equipment setup and radiated antenna, $psPD_{ref}$, shall be within the combined uncertainty of the combined relative uncertainty $u_{relative}$ according to Formula (A.7) or Formula (A.8) to Formula (A.9).

$$\Delta psPD_{ref} = \left| 10 \times \lg \left(\frac{psPD_{meas}}{psPD_{ref}} \right) \right| < \min(2 \times |u_{relative}|, 0,42 \text{ dB}, 2 \text{ dB} - \Delta psPD_{tgt}) \quad (\text{A.7})$$

or

$$\Delta psPD_{ref} = \left| \frac{psPD_{meas} - psPD_{ref}}{psPD_{ref}} \right| < \min(2 \times |u_{relative}|, 10\%, 58\% - \Delta psPD_{tgt}) \quad (\text{A.8})$$

$$u_{relative} = \sqrt{u_{power_relative}^2 + u_{meas_relative}^2} \quad (\text{A.9})$$

where

- $u_{power_relative}$ is the standard uncertainty ($k = 1$), in decibel, for the repeatability of the measured TRP (see Clause A.2);
- $u_{meas_relative}$ is the standard uncertainty ($k = 1$), in decibel, for the repeatability of the measurement system (probe calibration, electronics, and positioning);
- $2 \times u_{relative}$ shall not exceed 0,42 dB (10 %) or 2 dB – $\Delta psPD_{tgt}$, whichever is less, where the most recent $\Delta psPD_{tgt}$ is used (see A.3.4 a) or A.4.4). The criterion $2 \times u_{relative} \leq 2 \text{ dB} - \Delta psPD_{tgt}$ is established so that the absolute system check does not exceed 2 dB.

If the measurement system uses direct near-field measurements (see E.2.4), the relative system check criteria according to Formula (A.7) or Formula (A.8) may be applied on the E-field or H-field instead of the power density, replacing $psPD_{meas}$ and $psPD_{ref}$ with the measured and reference values, respectively, of the peak spatial-average E-field or the peak spatial-average H-field, as appropriate to the probe type. This allows a system that uses two probes (one E-field probe and one H-field probe) to apply the relative system check on each probe separately. The methodology and uncertainty of the peak spatial-average E-field or peak spatial-average H-field calculation shall be documented.

The reference value, $psPD_{ref}$, shall be determined for the specific instrumentation combination (software version, probe, acquisition electronics, antenna, frequency, etc.) used by the laboratory. If a laboratory has multiple probes and/or multiple acquisition electronics, the laboratory may use a single reference value, $psPD_{ref}$, only if the laboratory demonstrates that the reference value does not vary by more than $\pm 2\%$ between the probes and/or electronics used in the laboratory.

A.4 Absolute system check

A.4.1 Purpose

Absolute system check is a verification that the equipment at the user site has been installed correctly and that the equipment performance has not degraded since system validation. This procedure is easier than system validation so that it can be readily performed by the testing laboratory.

The absolute system check is a 1 cm² and/or 4 cm² *psPD* measurement with a radiating antenna at one frequency and one distance. The absolute system check shall be done for all tested frequency bands. The system components, software settings, and other system parameters shall be the same as those used for the conformity tests.

A.4.2 Antenna and test conditions

The evaluation surface shall be irradiated using an antenna described in Annex B. The antenna shall have an absolute target value derived from numerical simulations and verified by measurements. The antenna shall have a valid calibration certificate.

The antenna shall be positioned so that power density can be evaluated on a surface where the target values are given, typically positioned parallel to the evaluation surface. The distance between the evaluation surface and the antenna, *s*, shall be set with precision ensuring the repeatability does not exceed the DUT alignment uncertainty (8.5.6)

A.4.3 Procedure

The absolute system check procedure is as follows.

- Measure the *psPD* of the system check antenna using the measurement procedure in Clause 7.
- Normalize to the *psPD* to 0 dBm *TRP* that had been calibrated or is measured as in Option 1 or Option 2 of Clause A.2.
- Compare the normalized *psPD* to the target value.
- Apply the acceptance criteria described in A.4.4.

A.4.4 Acceptance criteria

The absolute system check is successful if all absolute differences between the measured values, *psPD*_{meas}, and target values, *psPD*_{tgt}, of *psPD* are within the combined uncertainty *u*_{comb} of the measurement system and the calibrated antenna, according to Formula (A.10) if the uncertainty is expressed in decibel, or according to Formula (A.11) if the uncertainty is expressed in percent, along with Formula (A.12).

$$\Delta psPD_{tgt} = \left| 10 \times \lg \left(\frac{psPD_{meas}}{psPD_{tgt}} \right) \right| < \min(2 \times |u_c|, 2 \text{ dB}) \quad (\text{A.10})$$

or

$$\Delta psPD_{tgt} = \left| \frac{psPD_{meas} - psPD_{tgt}}{psPD_{tgt}} \right| < \min(2 \times |u_c|, 58\%) \quad (\text{A.11})$$

$$u_c = \sqrt{u_{\text{antenna_cal}}^2 + u_{\text{power}}^2 + u_{\text{meas}}^2} \quad (\text{A.12})$$

where

$psPD_{tgt}$	is the absolute target value, derived from numerical simulations, normalized to 0 dBm <i>TRP</i> ;
$u_{antenna_cal}$	is the standard uncertainty ($k = 1$), of the $psPD$ of the antenna model comprising both numerical and the physical modelling of the calibrated antenna;
u_{power}	is the standard uncertainty ($k = 1$), for the measured <i>TRP</i> (see Clause A.2);
u_{meas}	is the standard uncertainty ($k = 1$), of the $psPD$ measurement (probe calibration, electronics, and positioning).

The deviation $\Delta psPD_{tgt}$ is limited to 2 dB (58 %) to facilitate good measurement reproducibility.

A.5 System validation

A.5.1 Purpose

System validation is a procedure that uses specific antennas to validate that a measurement system operates within the stated measurement uncertainty. In other words, it verifies that the accuracy is adequate for its intended use according to this document. This setup utilizes a flat evaluation surface and all system validation antennas specified in Annex B. Thus, this validation process should include all uncertainty contributors to the system validation as determined in Clause 8. System validation shall be performed on a calibrated system each time that hardware and/or software modifications are made that might impact the PD assessment (e.g. modifications to the probe(s), reconstruction algorithms, or readout electronics or probes, and calibration of system components). The system validation may be performed by the system manufacturer or by the user of the system.

A.5.2 Procedure

The system validation is a 1 cm² and/or 4 cm² $psPD$ measurement for a limited frequency range using all validation antennas (Annex B). The $psPD$ measurement should be performed according to the procedures described in Clause 7. The results are compared to the numerical target values that are normalized to the *TRP* (see Table B.1 in Clause B.2, Table B.5 in B.3.2, and Table B.8 in B.4.2).

The system validation procedure consists of multiple steps that validate different aspects of the uncertainty of the measurement system (see the measurement uncertainty model in Clause 8). Therefore, the system validation shall meet the following requirements.

- System validation shall cover the range of frequencies used by the system for conformity test.
- The measurement system shall be calibrated according to Annex C.
- Every test frequency shall have a valid calibration.
- Each validation antenna in Annex B, except those that are outside the specified measurement range of the measurement system, shall be measured at all evaluation surfaces specified in Annex B (2 mm, 5 mm, 10 mm, and 50 mm). These measurements are performed at one power level using a CW signal.
- At least two of the validation antennas in Annex B shall be measured at power levels that provide $psPD$ values that cover the dynamic range of the measurement system. The power shall be varied in 6 dB steps from the minimum to maximum levels over the dynamic range. A CW signal is used. One evaluation surface is used for each antenna.

- f) One antenna in Annex B shall be tested using a range of communication signals. The set of communication signals shall have a range of peak-to-average power ratios, occupied bandwidths, and modulation types in order to validate that the system accurately measures any tested signal type. Examples of modulations are given in A.5.3. One evaluation surface is used for the test.
- g) The antennas and RF measuring equipment used for the validation shall be an independent set of equipment from those used for probe calibration (Annex C). Using different sets of equipment avoids any calibration biases being passed on to the validation.

A.5.3 Validation of modulation response

The modulations listed in Table A.2 shall be used to validate the measurement system using broadband pyramidal horn antennas as specified in Clause B.2. Additional modulations may also be tested to verify that the probe calibration (Annex C) is valid for the types of modulated signals used by DUT. The limitations of the modulation response and frequency shall be clearly stated by the system manufacturer.

Table A.2 – Communication signals for modulation response test

Group	No.	Group type	Modulation type	Access scheme	Description
G1	M1	Reference non modulated – Low PAPR	CW	n/a	Unmodulated carrier
	M7	Reference non modulated – High PAPR	CW	n/a	Pulse signal with a period of 10 ms and a duty cycle of 10 % (1 ms ON, 9 ms OFF)
G2	M2	High PAPR	QPSK	CP-OFDM	5G NR (CP-OFDM, 1 RB, 100 MHz, QPSK, 60 kHz)
	M3	High PAPR	16-QAM	CP-OFDM	5G NR (CP-OFDM, 100 % RB (32 RBs), 50 MHz, 16QAM, 120 kHz)
	M4	High PAPR	64-QAM	CP-OFDM	5G NR (CP-OFDM, 50 % RB (33 RBs), 100 MHz, 64QAM, 120 kHz)
G3	M5	Low PAPR	QPSK	DFT-s-OFDM	5G NR (DFT-s-OFDM, 1 RB, 50 MHz, QPSK, 120 kHz)
	M6	Low PAPR	QPSK	DFT-s-OFDM	5G NR (DFT-s-OFDM, 100 % RB (64 RBs), 100 MHz, QPSK, 120 kHz)
G4	M8	Wideband	QPSK	DFT-s-OFDM	5G NR (DFT-s-OFDM, 100% RB (256 RBs) 400 MHz, QPSK, 120 kHz)
NOTE 1 These configurations are for non-signalling mode with no maximum power reduction applied and RBs centred in the middle of the channel.					
NOTE 2 G2 and G3 are based on the Reference Channels definition in 3GPP TS 38.521-2 [22].					

A.5.4 Acceptance criteria

The validation criteria have been specified to meet the objectives as specified in A.4.1, i.e. to verify that the PD measurement system is operating within its range of specified use and corresponding uncertainty as determined in Clause 8.

The system validation is successful if all absolute differences between the measured values, $psPD_{meas}$, and target values, $psPD_{tgt}$, of $psPD$ of the calibrated antenna are within the expanded combined uncertainty u_{comb} of the measurement system and the calibrated antenna, according to Formula (A.13) if the uncertainty is expressed in decibel, or according to Formula (A.14) if the uncertainty is expressed in percent, along with Formula (A.15).

$$\left| 10 \times \lg \left(\frac{psPD_{\text{meas}}}{psPD_{\text{tgt}}} \right) \right| < \min(2 \times |u_c|, 2 \text{ dB}) \quad (\text{A.13})$$

or

$$\left| \frac{psPD_{\text{meas}} - psPD_{\text{tgt}}}{psPD_{\text{tgt}}} \right| < \min(2 \times |u_c|, 58 \%) \quad (\text{A.14})$$

$$u_c = \sqrt{u_{\text{antenna_cal}}^2 + u_{\text{power}}^2 + u_{\text{meas}}^2} \quad (\text{A.15})$$

where

$psPD_{\text{tgt}}$	is the absolute target value (1 cm ² and/or 4 cm ²), derived from numerical simulations, normalized to 0 dBm TRP;
$u_{\text{antenna_cal}}$	is the standard uncertainty ($k = 1$), comprising both numerical and physical modelling of the calibrated antenna;
u_{power}	is the standard uncertainty ($k = 1$), for the measured TRP (see Clause A.2);
u_{meas}	is the standard uncertainty ($k = 1$), for the measurement system (probe calibration, electronics, and positioning).

The deviation is limited to 2 dB (58 %) to facilitate good reproducibility of results from the measurement system and antenna.

Annex B (normative)

Antennas for system check and system validation tests

B.1 General

This Annex B describes reference sources for system checks and system validation for the frequency range from 6 GHz to 100 GHz (the concepts of which are extendable to 300 GHz). The pyramidal horn antennas described in Clause B.2 may be used for relative system check and absolute system check. The cavity-fed dipole arrays (Clause B.3) and the pyramidal horns with slot arrays (Clause B.4) shall be used for system validation, because they represent the range of sources under test that are relevant to this document.

- a) The following are minimum requirements for any antenna used for relative system check.
 - 1) It shall be a simple, well-specified structure that can routinely be used with good mechanical stability and positioning repeatability.
 - 2) It shall have good impedance match at the operating frequency (return loss greater than 20 dB).
 - 3) Justification shall be provided why the proposed set of tests are sufficient to prove that the system operates within its specifications including uncertainty.
- b) The following are minimum requirements for the antennas used for absolute system check and system validation.
 - 1) The antennas shall be validated following the detailed procedure in Clause B.5.
 - 2) The antennas shall test the capability of the measurement system to determine the $psPD$ for the specified frequency range of the system.
 - 3) Detailed drawings, including all dimensions and tolerances, shall be provided. CAD files of the antennas shall be made available with sufficient detail of the construction and parameters so that the numerical targets can be independently verified.
 - 4) Target values shall be provided from high-resolution numerical simulations of the CAD file of the antenna and confirmed by a third-party laboratory and included in the test report. These shall be available for all specified test configurations on the phantoms. The precision of the target value shall be better than the uncertainty of the system.
 - 5) The target values shall be verified using a PD measurement system that has a calibration traceable to SI units, to validate the numeric target values.
 - 6) The test protocol (e.g. frequencies, locations on the phantom, distance, rotation angle) shall be provided.
 - 7) The antennas shall be those specified in Clause B.3 and Clause B.4.

NOTE It is possible that additional sources for system validation will be added to those described in Clause B.3 and Clause B.4 through an amendment or revision of this document.

- 8) The antennas shall not be used within any calibration or tuning process of a PD measurement system.
- 9) Physical antennas shall be measured using a PD measurement system that has a calibration traceable to SI units, to validate the numeric target values.

B.2 Pyramidal horn antennas for system checks

The sources used for relative system check and absolute system check can be simple pyramidal horn antennas, e.g. as shown in Figure B.8 (see B.4.1). At the centre of the aperture, the horn antennas provide a linearly-polarized electric field in the y direction and a linearly-polarized magnetic field in the x direction, e.g. approximately far-field characteristics. These horn antennas have a coaxial feed or a waveguide feed.

The system check sources in this document are specified at four frequencies: 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz, and 90 GHz. If the calibration parameters change between these frequencies, additional system check sources shall be specified (see Clause B.5). The dimensions of the pyramidal horn antenna at each of these frequencies are listed in Table B.7. The return loss should be better than 20 dB. The microwave source feeding the horn antenna should have harmonics less than –20 dBc.

Table B.1 provides the target values for the E-field, H-field, and power density from pyramidal horn antennas, as obtained according to Clause B.1 b) 4). All target values are the maximum values in surfaces at distances of $d = 10$ mm and 150 mm from the horn aperture. Target values correspond to a TRP of 0 dBm. $E_{\max} = \max(|E_{\text{tot}}|)$ and $H_{\max} = \max(|H_{\text{tot}}|)$ are the maximum local E-field and H-field magnitudes according to 6.7.1.3.

$\max(S_{n+})$, $\max(S_{\text{tot}+})$, and $\max(S_{\text{mod}+})$ are the maximum local power densities according to 6.7.1.2, 6.7.1.3, and 6.7.1.4, respectively. The $psPD_{n+}(1 \text{ cm}^2)$, $psPD_{n+}(4 \text{ cm}^2)$, $psPD_{\text{tot}+}(1 \text{ cm}^2)$, $psPD_{\text{tot}+}(4 \text{ cm}^2)$, $psPD_{\text{mod}+}(1 \text{ cm}^2)$, and $psPD_{\text{mod}+}(4 \text{ cm}^2)$ are maximum spatial-average power densities according to 6.7.1.2, 6.7.1.3, and 6.7.1.4, and for circular surfaces of 1 cm² and 4 cm² area, respectively.

Table B.1 – Target values for pyramidal horn antennas at different frequencies

f [GHz]	d [mm]	Max. E-field $E_{\max}$ [V/m]	Max. H-field $H_{\max}$ [A/m]	Max. local power density $\max(S_{n+})$ $\max(S_{\text{tot}+})$ $\max(S_{\text{mod}+})$ [W/m ²]	Max. averaged power density $psPD_{n+}$ $psPD_{\text{tot}+}$ $psPD_{\text{mod}+}$ (1 cm ²) [W/m ²]	Max. averaged power density $psPD_{n+}$ $psPD_{\text{tot}+}$ $psPD_{\text{mod}+}$ (4 cm ²) [W/m ²]
10*	10	15,7	0,042 6	0,672	0,661	0,623
	150	6,36	0,017 1	0,112	0,111	0,109
10**	10	24,6	0,070 4	1,73	1,59	1,25
	150	4,78	0,012 6	0,060 5	0,060 2	0,059 6
30	10	23,2	0,062 9	1,48	1,30	1,11
	150	8,95	0,024 3	0,219	0,215	0,205
60	10	37,4	0,104	4,06	3,08	2,08
	150	9,57	0,026 1	0,263	0,256	0,240
90	10	49,2	0,135	6,85	5,20	2,36
	150	10,1	0,027 3	0,284	0,260	0,248

NOTE 1 All results are normalized to a TRP of 0 dBm and are independent of CW or modulated signal.

NOTE 2 * and ** in the left column denote two different source antennas.

B.3 Cavity-fed dipole arrays for system validation

B.3.1 Description

This category of antennas shall be used for system validation. It consists of a cavity-backed array of dipoles arranged in an offset lattice according to the modes generated into the resonant cavity. The dipoles are printed onto one face of a low loss tangent dielectric substrate (e.g. RO4003C from Rogers³) and excited by non-resonant rectangular slots located on the opposite face of the substrate as shown in Figure B.1. The excitation modes are generated by the resonant cavity, which is fabricated in copper and may be plated with gold to reduce the losses. The substrate (with dipoles and slots printed at its top and bottom surfaces, respectively) is mounted to the resonant cavity by soldering. A probe feed from a 2,92 mm coaxial connector is used for the 10 GHz and 30 GHz dipole arrays, as shown in Figure B.1 c). For higher frequencies, the feeding can require an iris opened at the end of a waveguide instead of a probe feed. A WR15 waveguide (with UG-385/U flange) and a WR10 waveguide (with UG-387/U-M) are used for the 60 GHz and 90 GHz dipole arrays, respectively. The diameter of the iris should be tuned to give the best match. The arrays have been optimized to achieve a return loss typically better than 15 dB. In order to fine-tune the array, two tuning screws are included in the centres of two cavity walls so that they enter the cavity in the direction perpendicular to the dipoles. The diameters of the tuning screws are 4 mm, 3 mm, 2 mm, and 1,2 mm for the 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz, and 90 GHz dipole arrays, respectively.

Figure B.1 shows the perspective, top and side views of the dipole array. The parameter descriptions and main dimensions are shown in Table B.2, Table B.3, and Table B.4 for each frequency.

Table B.2 – Main dimensions for the cavity-fed dipole arrays at each frequency of interest

Frequency [GHz]	Number of dipoles and slots along x	Number of dipoles and slots along y	Dipole width d_x [mm]	Dipole length d_y [mm]	Slot length s_x [mm]	Slot width s_y [mm]
10	3	3	2,40 ± 0,05	5,10 ± 0,05	5,70 ± 0,05	1,20 ± 0,05
30	3	3	0,8 ± 0,05	1,86 ± 0,05	1,90 ± 0,05	0,40 ± 0,05
60	3	3	0,40 ± 0,025	0,986 ± 0,025	0,95 ± 0,025	0,20 ± 0,025
90	3	3	0,267 ± 0,02	0,640 ± 0,02	0,613 ± 0,02	0,113 ± 0,02

³ RO4003C from Rogers is an example of a suitable product available commercially. This information is given for the convenience of users of this document and does not constitute an endorsement by IEC or IEEE of this product.

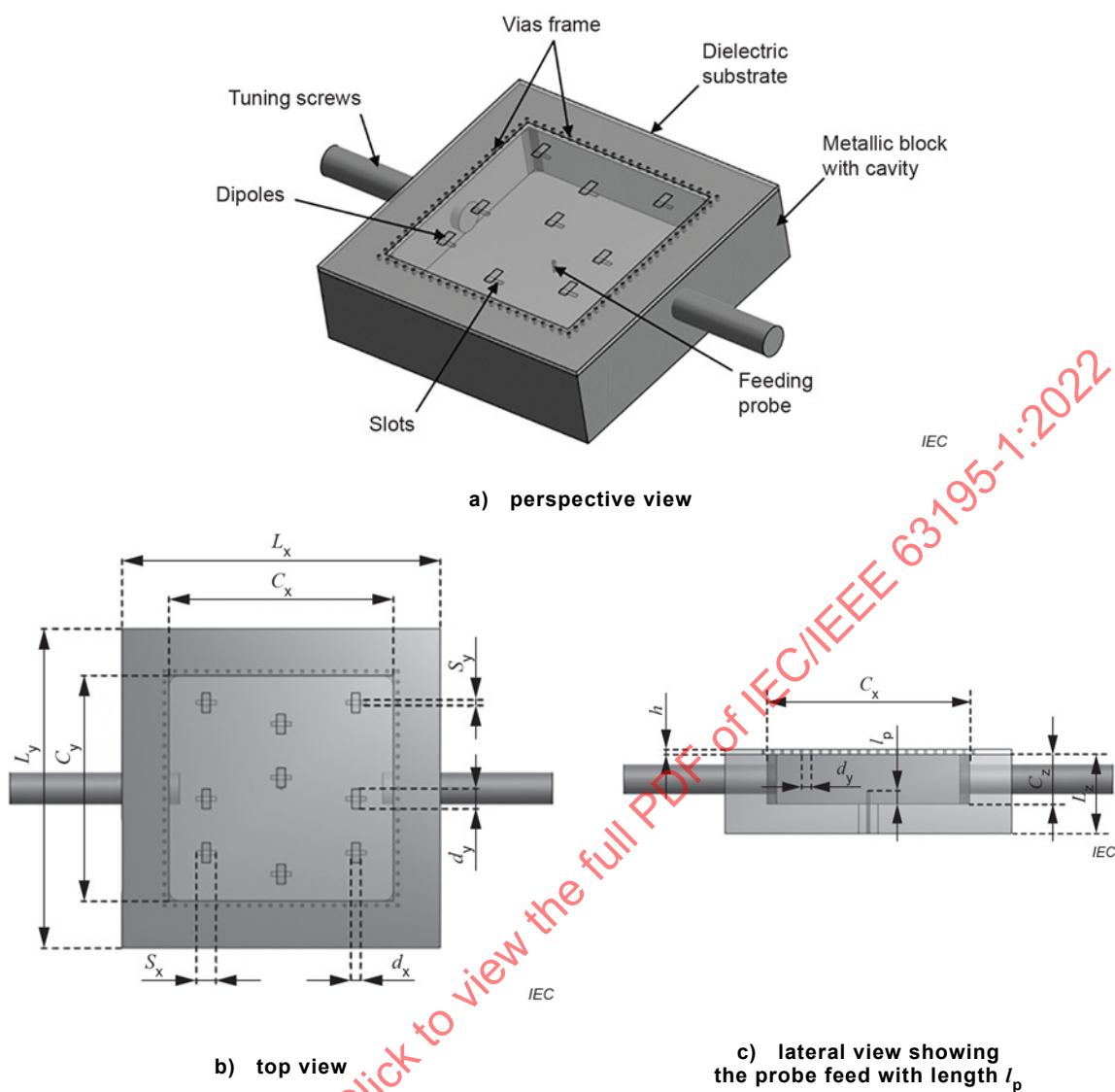


Figure B.1 – Main dimensions for the cavity-fed dipole arrays – 30 GHz design

Table B.3 – Geometrical parameters of the cavity-fed dipole arrays at each frequency of interest

Frequency [GHz]	Relative position in x dimension of each dipole/slot centre with respect to the centre of the cavity [mm]	Relative position in y dimension of each dipole/slot centre with respect to the centre of the cavity [mm]	Distance between vias D_v [mm]	Feeding probe length inside the cavity l_p [mm]	Cavity length C_x [mm]	Cavity width C_y [mm]	Cavity height C_z [mm]
10	+21,18/0/+21,18 -21,18/0/+21,18 -21,18/0/+21,18 ($\pm 0,05$)	+24,18/+18,18/+24,18 -3/+3/-3 -18,18/-24,18/-18,18 ($\pm 0,05$)	$1 \pm 0,05$	4,8 $\pm 0,05$	63,54 $\pm 0,05$	63,54 $\pm 0,05$	10 $\pm 0,05$
30	-7,06/0/+7,06 -7,06/0/+7,06 -7,06/0/+7,06 ($\pm 0,05$)	+8,06/+6,06/+8,06 -1/+1/-1 -6,06/-8,06/-6,06 ($\pm 0,05$)	$1 \pm 0,05$	1,3 $\pm 0,05$	21,18 $\pm 0,05$	21,18 $\pm 0,05$	5 $\pm 0,05$
60	-3,53/0/+3,53 -3,53/0/+3,53 -3,53/0/+3,53 ($\pm 0,02$)	+4,03/+3,03/+4,03 -0,5/+0,5/-0,5 -3,03/-4,03/-3,03 ($\pm 0,02$)	$0,5 \pm 0,05$	n/a	10,66 $\pm 0,025$	10,66 $\pm 0,025$	3,0 $\pm 0,05$
90	-2,35/0/+2,35 -2,35/0/+2,35 -2,35/0/+2,35 ($\pm 0,02$)	+2,69/+2,02/+2,69 -0,33/+0,33/-0,33 -2,02/-2,69/-2,02 ($\pm 0,02$)	$0,5 \pm 0,05$	n/a	7,07 $\pm 0,02$	7,07 $\pm 0,02$	2,0 $\pm 0,05$

Table B.4 – Substrate and metallic block parameters for the cavity-fed dipole arrays at each frequency of interest

Frequency [GHz]	Substrate thickness h [mm]	Substrate relative permittivity	Substrate dielectric loss tangent	Metallic block length L_x [mm]	Metallic block width L_y [mm]	Metallic block height L_z [mm]
10	0,813 $\pm 0,05$	3,62 $\pm 0,05$	0,002 7	75 $\pm 0,1$	75 $\pm 0,1$	12 $\pm 0,5$
30	0,508 $\pm 0,05$	3,62 $\pm 0,05$	n/a	30 $\pm 0,1$	30 $\pm 0,1$	8 $\pm 0,5$
60	0,305 $\pm 0,025$	3,62 $\pm 0,05$	n/a	20 $\pm 0,1$	20 $\pm 0,1$	6,5 $\pm 0,5$
90	0,203 $\pm 0,02$	3,62 $\pm 0,05$	n/a	15 $\pm 0,1$	15 $\pm 0,1$	5,5 $\pm 0,5$

B.3.2 Numerical target values for cavity-fed dipole arrays

Table B.5 provides the target values for the E-field, H-field, and power density of the cavity-fed dipole arrays specified in B.3.1, as obtained according to Clause B.1 b) 4). All target values are the maximum values in surfaces at distances of $d = 2$ mm, 5 mm, 10 mm, and 50 mm parallel to the top surface of the dielectric substrate. Target values correspond to a TRP of 0 dBm. $E_{\max} = \max(|E_{\text{tot}}|)$ and $H_{\max} = \max(|H_{\text{tot}}|)$ are the maximum local E-field and H-field magnitudes according to 6.7.1.3.

$\max(S_{n+})$, $\max(S_{\text{tot}+})$ and $\max(S_{\text{mod}+})$ are the maximum local power densities according to 6.7.1.2, 6.7.1.3, and 6.7.1.4, respectively. The $psPD_{n+}(1 \text{ cm}^2)$, $psPD_{n+}(4 \text{ cm}^2)$, $psPD_{\text{tot}+}(1 \text{ cm}^2)$, $psPD_{\text{tot}+}(4 \text{ cm}^2)$, $psPD_{\text{mod}+}(1 \text{ cm}^2)$, and $psPD_{\text{mod}+}(4 \text{ cm}^2)$ are maximum spatial-average power densities according to 6.7.1.2, 6.7.1.3, and 6.7.1.4, and for circular surfaces of 1 cm^2 and 4 cm^2 area, respectively.

Table B.5 – Target values for the cavity-fed dipole arrays at 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz, and 90 GHz

f	d	Max. E-field $E_{\max}$	Max. H-field $H_{\max}$	Max. local power density $\max(S_{n+})$	Max. local power density $\max(S_{\text{tot}+})$	Max. local power density $\max(S_{\text{mod}+})$	Max. avg. power density $psPD_{n+}(1 \text{ cm}^2)$	Max. avg. power density $psPD_{n+}(4 \text{ cm}^2)$	Max. avg. power density $psPD_{\text{tot}+}(1 \text{ cm}^2)$	Max. avg. power density $psPD_{\text{tot}+}(4 \text{ cm}^2)$	Max. avg. power density $psPD_{\text{mod}+}(1 \text{ cm}^2)$	Max. avg. power density $psPD_{\text{mod}+}(4 \text{ cm}^2)$
[GHz]	[mm]	[V/m]	[A/m]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]
10	2	49,1	0,205	2,80	3,28	6,66	1,09	0,541	1,43	0,808	3,32	1,65
	5	23,0	0,062 1	1,16	1,20	1,41	0,804	0,445	0,852	0,537	0,990	0,658
	10	14,3	0,042 7	0,543	0,555	0,555	0,451	0,301	0,477	0,350	0,490	0,366
	50	13,2	0,035 5	0,481	0,482	0,482	0,456	0,390	0,457	0,391	0,458	0,395
30	2	63,3	0,157	6,82	6,90	7,42	2,38	1,73	3,12	2,43	3,91	3,08
	5	45,0	0,130	5,70	5,71	5,85	2,13	1,41	2,23	1,58	2,49	1,76
	10	40,6	0,105	4,27	4,36	4,36	2,40	1,17	2,43	1,21	2,52	1,27
	50	16,3	0,043 9	0,736	0,736	0,736	0,684	0,553	0,685	0,557	0,686	0,559
60	2	89,2	0,271	21,2	22,6	24,4	7,53	2,30	9,00	3,32	9,98	3,63
	5	93,2	0,246	23,0	23,3	23,4	5,20	2,00	5,51	2,42	5,82	2,55
	10	72,9	0,198	14,9	14,9	14,9	4,40	1,50	4,45	1,61	4,62	1,66
	50	18,6	0,050 2	0,964	0,964	0,964	0,873	0,664	0,876	0,671	0,876	0,672
90	2	125	0,315	34,7	37,1	38,3	7,29	2,37	8,88	3,76	9,51	3,94
	5	114	0,314	36,2	36,5	36,5	5,13	1,88	5,48	2,30	5,70	2,38
	10	78,6	0,212	16,7	16,7	16,7	3,83	1,42	3,90	1,57	3,99	1,60
	50	18,4	0,049 8	0,942	0,942	0,942	0,829	0,589	0,832	0,595	0,833	0,596

NOTE All results are normalized to a TRP of 0 dBm and are independent of CW or modulated signal.

B.3.3 Field and power density distribution patterns

The patterns of $|E_{\text{tot}}|$ and $\Re(S)_{\text{tot}} = 0,5 \times \Re(E \times H^*)_{\text{tot}}$ for the distances 2 mm, 5 mm, 10 mm, and 50 mm from the antenna surface and normalized to a TRP of 0 dBm, are shown in Figure B.2, Figure B.3, Figure B.4, and Figure B.5, for the cavity-fed dipole arrays at the operating frequencies of 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz, and 90 GHz, respectively. These figures are for illustration purposes only.

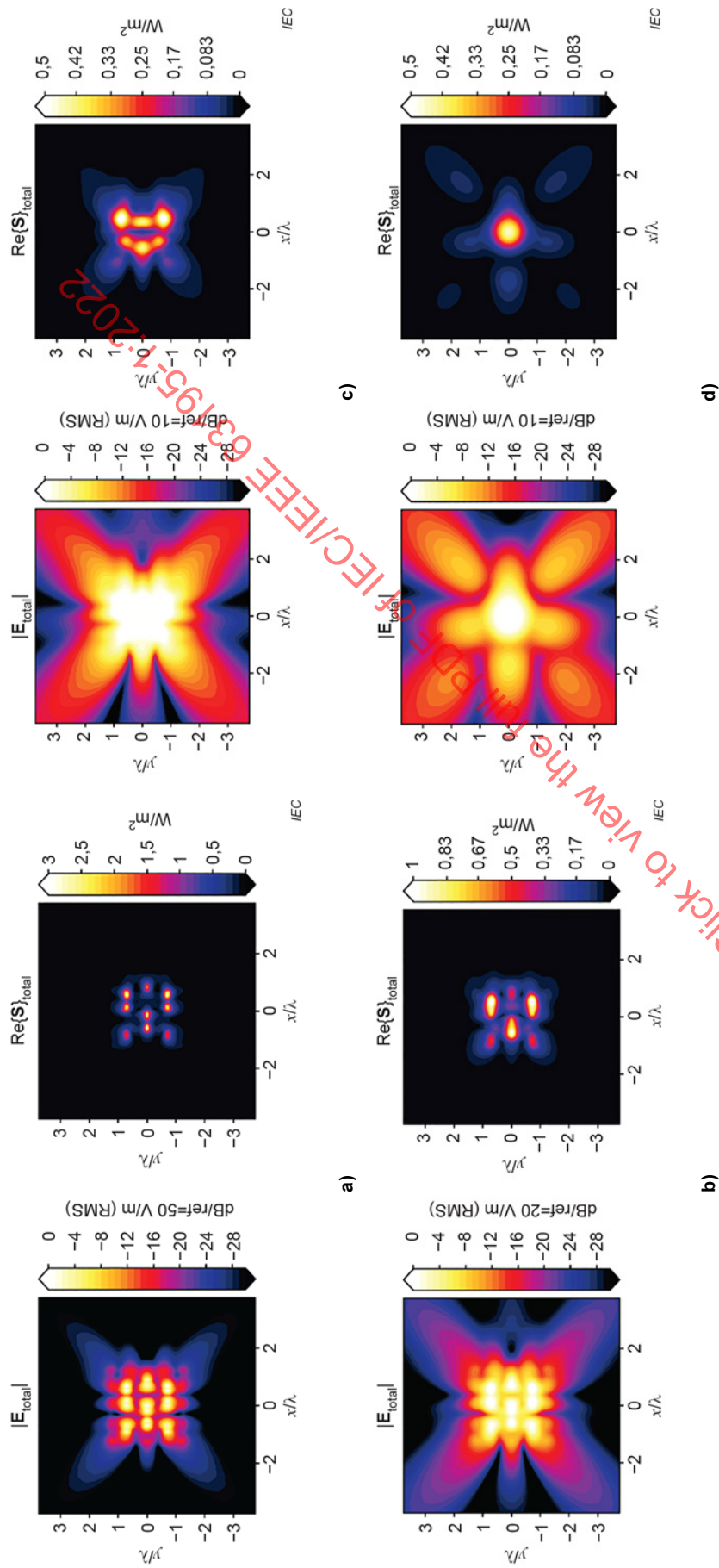


Figure B.2 – 10 GHz patterns of $|E_{\text{total}}|$ and $\text{Re}\{S_{\text{total}}\}$ for the cavity-fed dipole arrays at distances of
a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, and d) 50 mm from the upper surface of the dielectric substrate

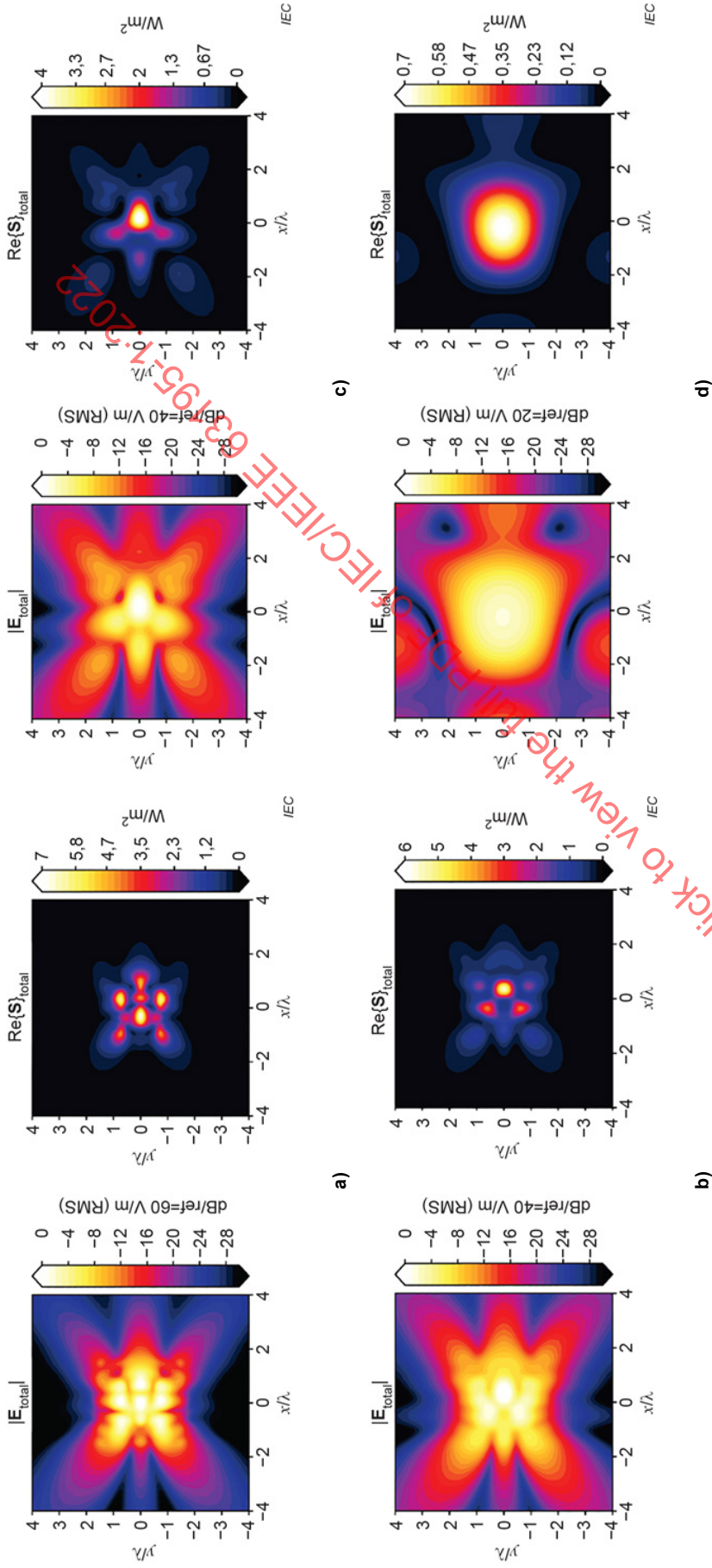


Figure B.3 – 30 GHz patterns of $|E_{\text{total}}|$ and $\text{Re}\{S\}_{\text{total}}$ for the cavity-fed dipole arrays at distances of
a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, and d) 50 mm from the upper surface of the dielectric substrate

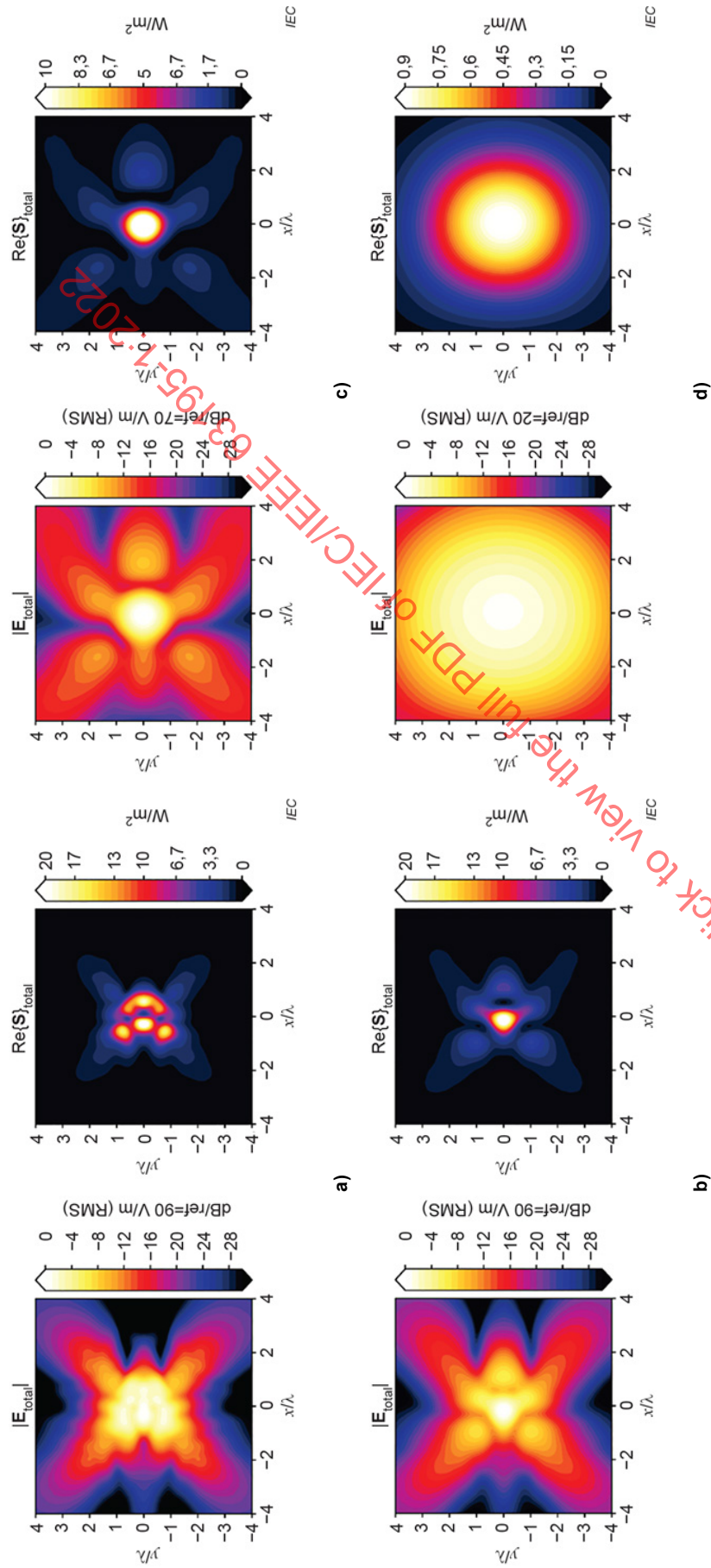


Figure B.4 – 60 GHz patterns of $|E|_{\text{total}}$ and $\text{Re}\{S\}_{\text{total}}$ for the cavity-fed dipole arrays at distances of a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, and d) 50 mm from the upper surface of the dielectric substrate

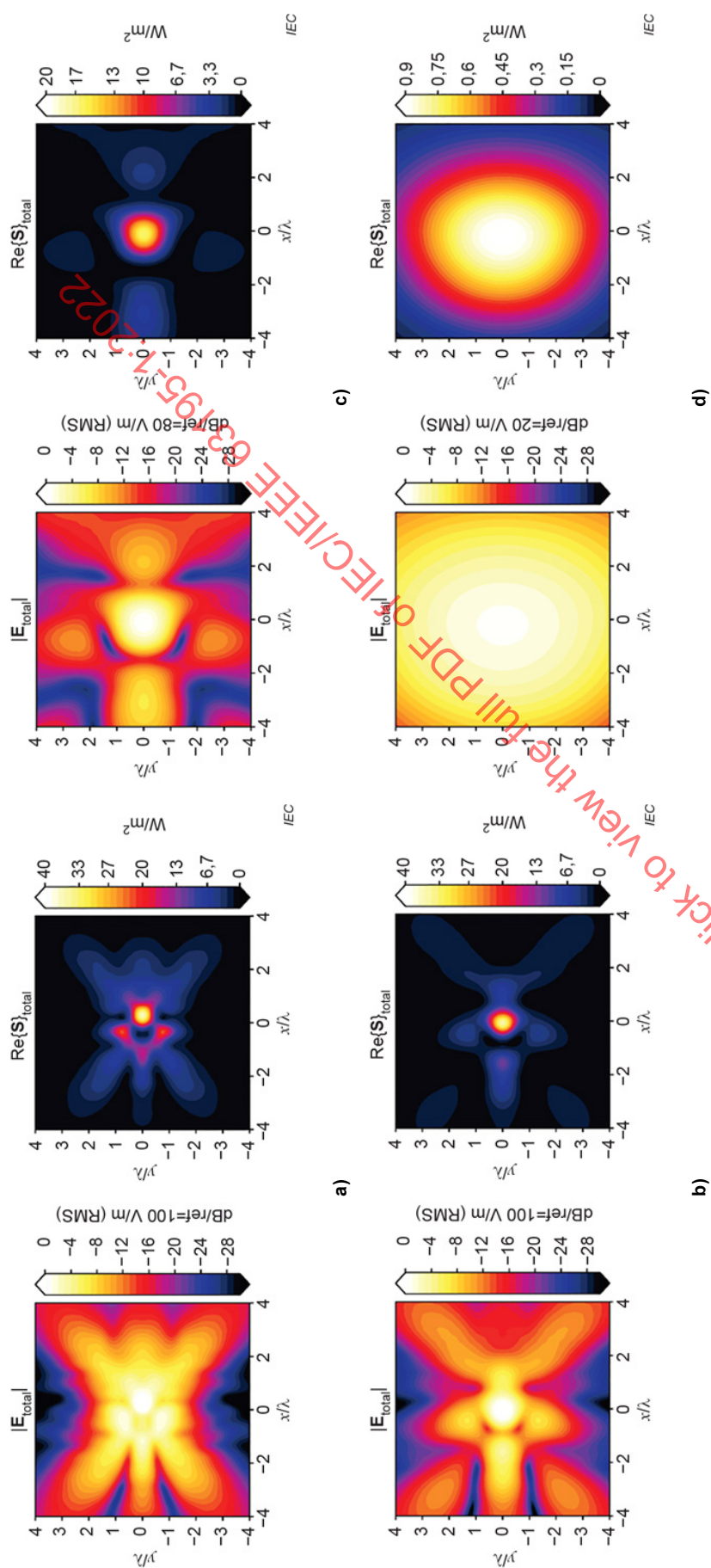
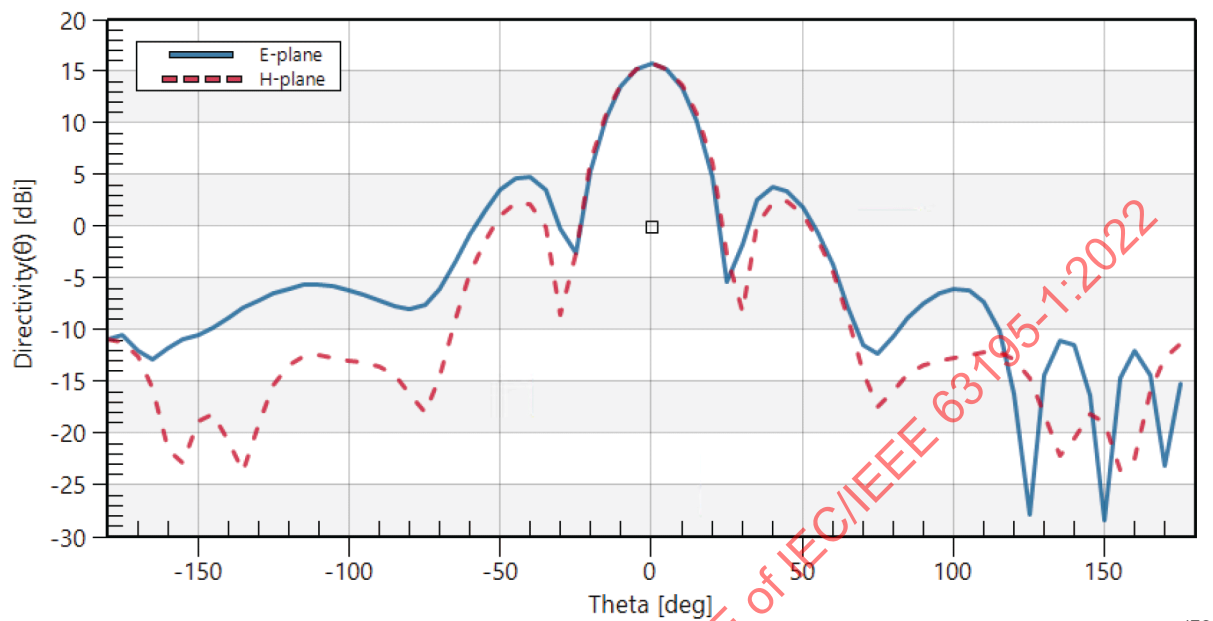


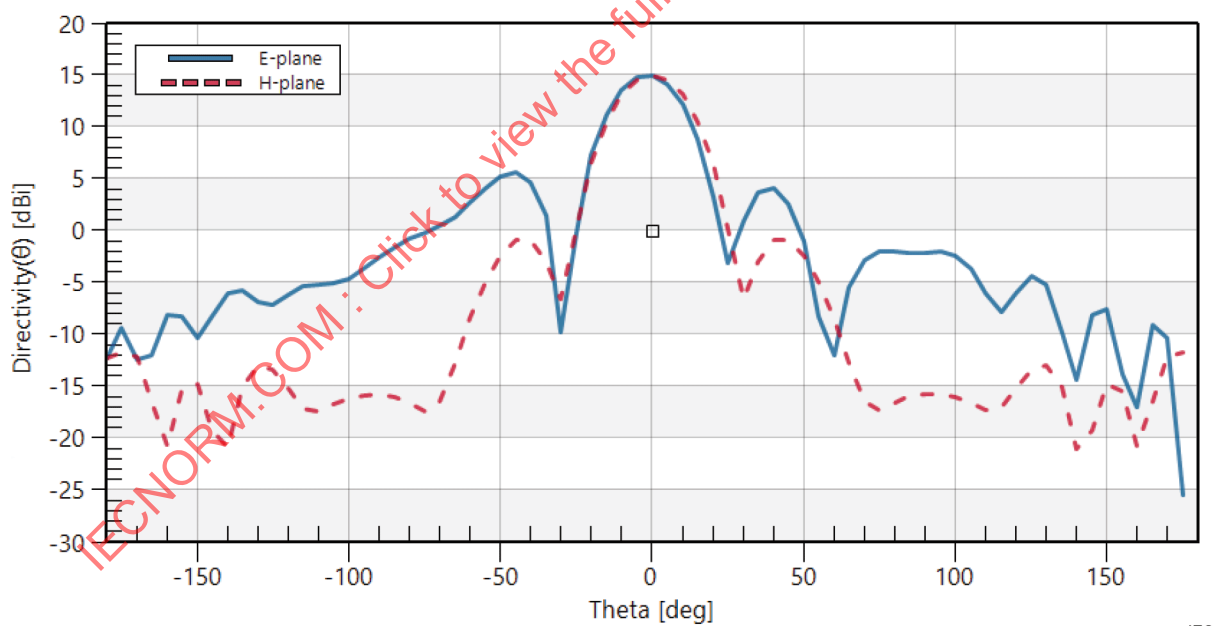
Figure B.5 – 90 GHz patterns of $|E|_{\text{total}}$ and $\text{Re}\{S\}_{\text{total}}$ for the cavity-fed dipole arrays at distances of a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, and d) 50 mm from the upper surface of the dielectric substrate

B.3.4 Far-field radiation patterns

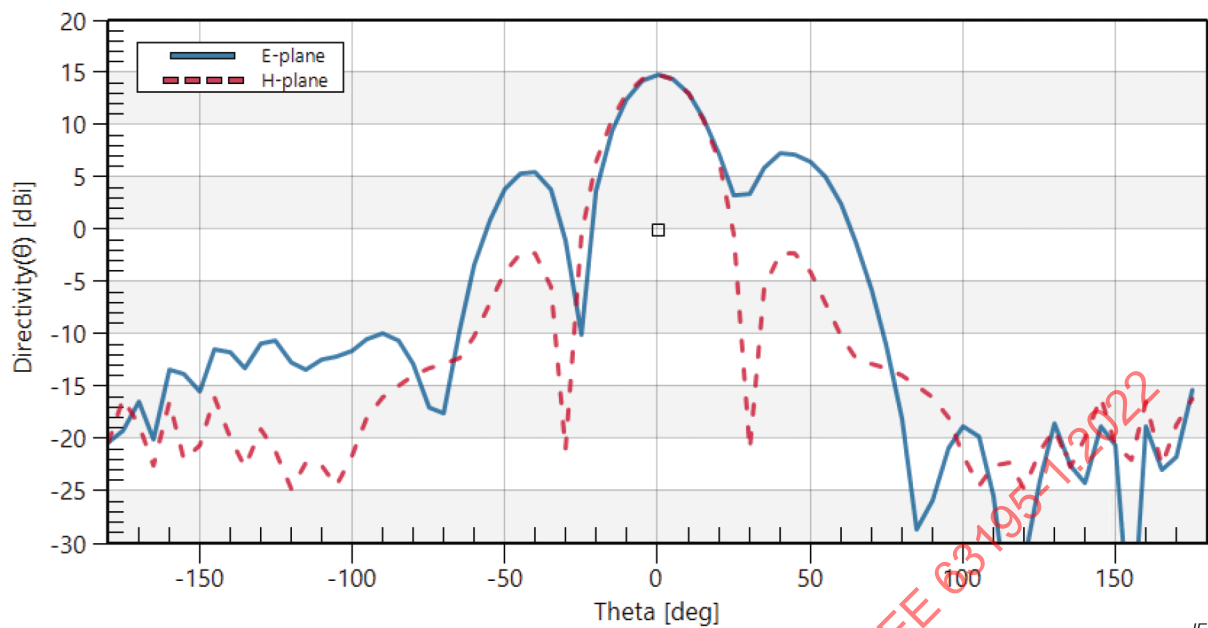
The far-field radiation patterns (in terms of the total directivity) are shown in Figure B.6 for the cavity-fed dipole arrays at the operating frequencies of 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz, and 90 GHz.



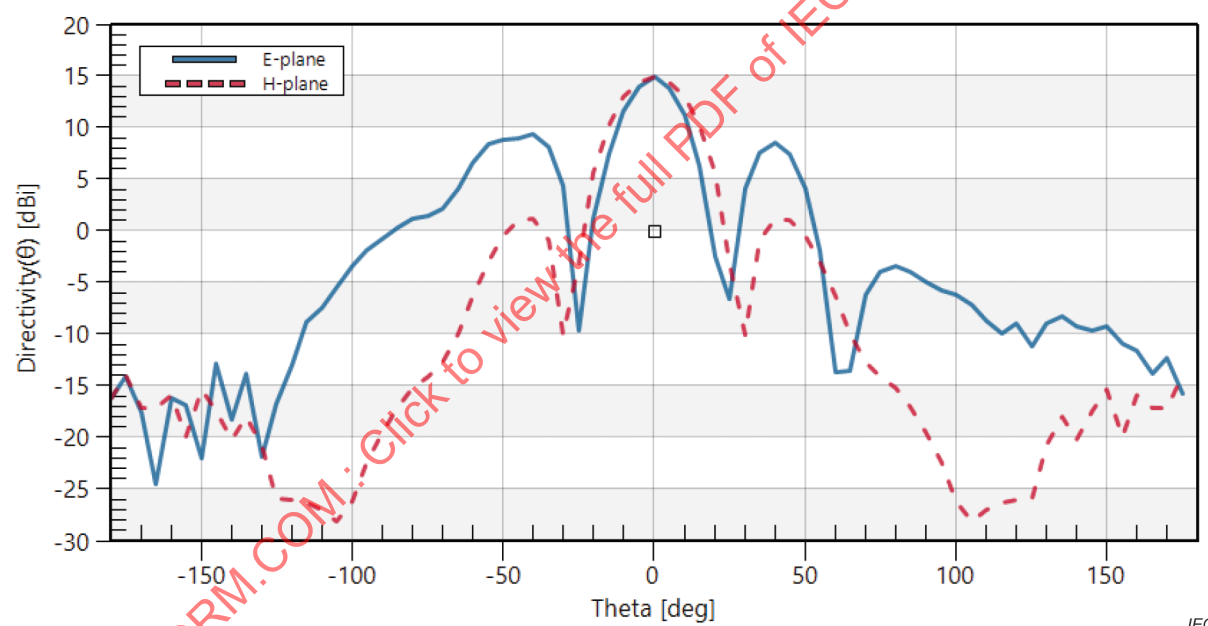
a)



b)



c)



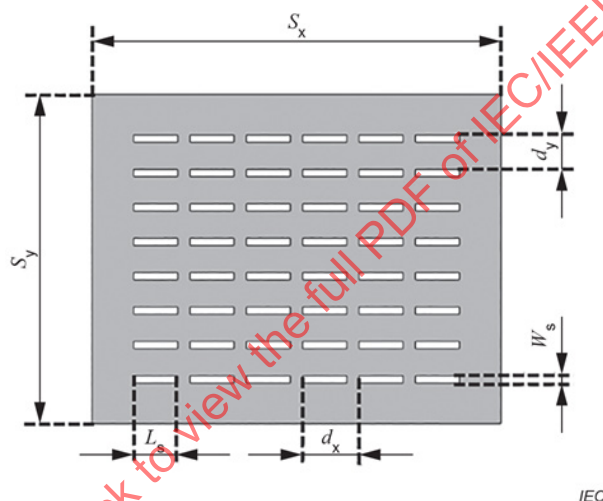
d)

Figure B.6 – Far-field radiation patterns of a) 10 GHz, b) 30 GHz, c) 60 GHz, and d) 90 GHz cavity-fed dipole arrays

B.4 Pyramidal horns with slot arrays for system validation

B.4.1 Description

This category of antenna shall be used for system validation. It consists of a pyramidal horn loaded with an array of rectangular slot antennas on the aperture. The 10 GHz horn is fabricated in aluminium and plated with stainless steel epoxy. The 30 GHz horn is fabricated in aluminium and plated with gold. The 60 GHz and 90 GHz horns are fabricated in brass and plated with gold. An SMA connector is used for the 10 GHz slot array. A WR28 waveguide (with UG-599/U flange), a WR15 waveguide (with UG-385/U flange), and a WR10 waveguide (with UG-387/U-M flange) are used for the 30 GHz, 60 GHz, and 90 GHz slot arrays, respectively. Because of the mismatch experienced by the pyramidal horn as a result of the loading with the arrays, the slot arrays have been optimized to provide a return loss typically better than 20 dB at the design frequency. The slots are symmetrically arranged on the horn aperture. They are fabricated on a 0,15 mm thick metal sheet. Figure B.7 shows the main dimensions for a generic stainless-steel stencil. The stencil is mounted to the pyramidal horn by soldering. The details for the dimensions of the stencil are summarized in Table B.6 for each frequency. The main dimensions for the pyramidal horns are shown in Figure B.8 and Table B.7.



NOTE The number of elements shown corresponds to the 90 GHz design.

Figure B.7 – Main dimensions for the 0,15 mm stainless steel stencil with slot array

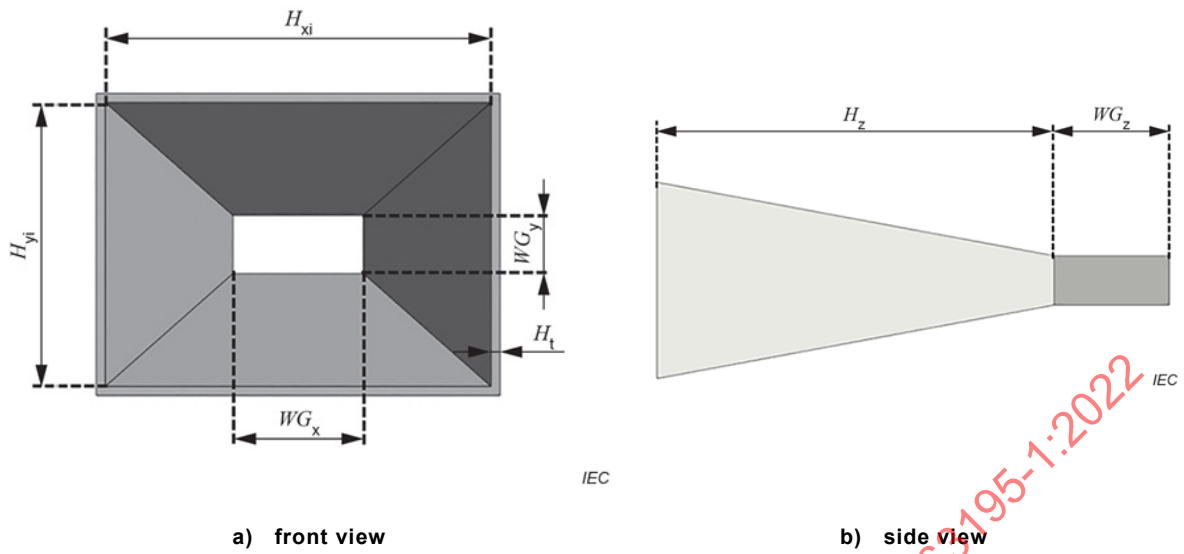


Figure B.8 – Main dimensions for the pyramidal horn antennas

Table B.6 – Main dimensions for the stencil with slot array for each frequency

Frequency	Stencil length S_x	Stencil width S_y	Stencil thickness	Number of slots along x	Number of slots along y	Slot length L_s	Slot width W_s	raster of slots along x d_x	raster of slots along y d_y
[GHz]	[mm]	[mm]	[mm]			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
10	70,75 ± 0,01	52,60 ± 0,01	0,150 ± 0,01	3	5	17,5 ± 0,01	2,4 ± 0,01	22,0 ± 0,015	10,0 ± 0,015
30	42,50 ± 0,01	33,80 ± 0,01	0,150 ± 0,01	6	7	5,40 ± 0,01	0,80 ± 0,01	6,70 ± 0,015	4,47 ± 0,015
60	23,40 ± 0,01	18,78 ± 0,01	0,150 ± 0,01	5	8	2,75 ± 0,01	0,42 ± 0,01	4,00 ± 0,015	2,08 ± 0,015
90	16,70 ± 0,01	13,40 ± 0,01	0,150 ± 0,01	6	8	1,80 ± 0,01	0,30 ± 0,01	2,30 ± 0,015	1,40 ± 0,015

Table B.7 – Primary dimensions for the corresponding pyramidal horns at each frequency

Frequency	Horn typical gain without stencil	Horn aperture along x (internal)	Horn aperture along y (internal)	Horn length	Horn thickness	Waveguide width	Waveguide height	Waveguide length
[GHz]	[dBi]	H_{xi}	H_{yi}	H_z	H_t	WG_x	WG_y	WG_z
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
10*	15	67,6 ± 0,2	49,5 ± 0,2	108 ± 0,2	1,53	22,86 ± 0,1	10,16 ± 0,05	30
10**	12	44,0 ± 0,2	34,7 ± 0,2	40,0 ± 0,2	1,25	22,86 ± 0,1	10,16 ± 0,05	10
30	20	40,79 ± 0,1	31,73 ± 0,1	47,24 ± 0,1	1,25	7,112 ± 0,1	3,556 ± 0,05	11
60	20	21,33 ± 0,1	16,65 ± 0,1	24,77 ± 0,1	1,25	3,759 ± 0,1	1,880 ± 0,05	6,2
90	20	14,2 ± 0,1	11 ± 0,1	17,20 ± 0,1	1,25	2,54 ± 0,1	1,27 ± 0,05	10,6
NOTE 1 Tolerances are not for the waveguide lengths because the results do not depend on deviations from the nominal lengths.								
NOTE 2 * and ** in the left column denote two different source antennas.								

B.4.2 Numerical target values for pyramidal horns loaded with a slot array

Table B.8 provides the target values for the E-field, H-field, and power density of the pyramidal horn loaded with an array of rectangular slot antennas specified in B.4.1, as obtained according to Clause B.1 b) 4). All target values are the maximum values in surfaces at distances of $d = 2 \text{ mm}$, 5 mm , 10 mm , and 50 mm parallel to the top surface of the slot array. Target values correspond to a TRP of 0 dBm. The maximum local E-field and H-field magnitudes are $E_{\max} = \max(|E_{\text{tot}}|)$ and $H_{\max} = \max(|H_{\text{tot}}|)$ according to 6.7.1.3.

$\max(S_{n+})$, $\max(S_{\text{tot}+})$, and $\max(S_{\text{mod}+})$ are the maximum local power densities according to 6.7.1.2, 6.7.1.3, and 6.7.1.4, respectively. The $psPD_{n+}(1 \text{ cm}^2)$, $psPD_{n+}(4 \text{ cm}^2)$, $psPD_{\text{tot}+}(1 \text{ cm}^2)$, $psPD_{\text{tot}+}(4 \text{ cm}^2)$, $psPD_{\text{mod}+}(1 \text{ cm}^2)$, and $psPD_{\text{mod}+}(4 \text{ cm}^2)$ are maximum spatial-average power densities according to 6.7.1.2, 6.7.1.3, and 6.7.1.4, and for circular surfaces of 1 cm^2 and 4 cm^2 area, respectively.

**Table B.8 – Target values for the pyramidal horns loaded with slot arrays
at 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz, and 90 GHz**

f	d	Max. E-field $E_{\max}$	Max. H-field $H_{\max}$	Max. local power density max (S_{n+})	Max. local power density max ($S_{\text{tot}+}$)	Max. local power density max ($S_{\text{mod}+}$)	Max. averaged power density $psPD_{n+}$ (1 cm ²)	Max. averaged power density $psPD_{n+}$ (4 cm ²)	Max. averaged power density $psPD_{\text{tot}+}$ (1 cm ²)	Max. averaged power density $psPD_{\text{tot}+}$ (4 cm ²)	Max. averaged power density $psPD_{\text{mod}+}$ (1 cm ²)	Max. averaged power density $psPD_{\text{mod}+}$ (4 cm ²)
[GHz]	[mm]	[V/m]	[A/m]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]
10	2	49,7	0,093 5	2,14	2,14	2,99	1,20	0,835	1,29	0,922	1,73	1,29
	5	25,7	0,054 3	1,18	1,18	1,31	0,999	0,761	1,02	0,815	1,14	0,908
	10	16,8	0,049 2	0,780	0,783	0,825	0,750	0,677	0,766	0,706	0,797	0,722
	50	14,3	0,038 6	0,552	0,552	0,553	0,533	0,481	0,534	0,482	0,534	0,485
30	2	35,6	0,091 8	2,94	2,97	3,04	1,79	1,32	1,91	1,41	2,05	1,53
	5	29,5	0,093 3	2,79	2,79	2,81	1,70	1,23	1,71	1,24	1,78	1,29
	10	24,3	0,070 2	1,67	1,67	1,69	1,35	1,08	1,40	1,11	1,41	1,12
	50	16,6	0,045 2	0,760	0,760	0,760	0,697	0,577	0,697	0,577	0,699	0,578
60	2	65,1	0,172	9,29	9,55	9,63	4,51	2,43	4,67	2,54	4,85	2,65
	5	63,0	0,167	10,4	10,5	10,5	3,87	2,35	3,95	2,41	4,02	2,46
	10	46,9	0,128	6,08	6,14	6,14	3,37	2,14	3,45	2,19	3,47	2,21
	50	24,7	0,067 3	1,74	1,74	1,74	1,48	0,977	1,48	0,980	1,48	0,983
90	2	82,2	0,238	19,4	19,6	19,6	8,31	2,48	8,44	2,56	8,60	2,62
	5	71,7	0,190	13,6	13,6	13,6	7,18	2,45	7,25	2,53	7,32	2,56
	10	50,7	0,138	7,26	7,26	7,26	5,57	2,35	5,61	2,41	5,64	2,42
	50	26,2	0,070 9	1,92	1,92	1,92	1,65	1,15	1,66	1,15	1,66	1,15

NOTE All results are normalized to a TRP of 0 dBm and are independent of CW or modulated signal.

B.4.3 Field and power density distribution patterns

The patterns of $|E_{\text{tot}}|$ and $\Re(S)_{\text{tot}} = 0,5 \times \Re(E \times H^*)_{\text{tot}}$ for the distances 2 mm, 5 mm, 10 mm, and 50 mm from the antenna surface and normalized to a TRP of 0 dBm, are shown in Figure B.9, Figure B.10, Figure B.11, and Figure B.12 for the pyramidal horns loaded with a slot array at the operating frequencies of 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz, and 90 GHz, respectively. These figures are for illustration purposes only.

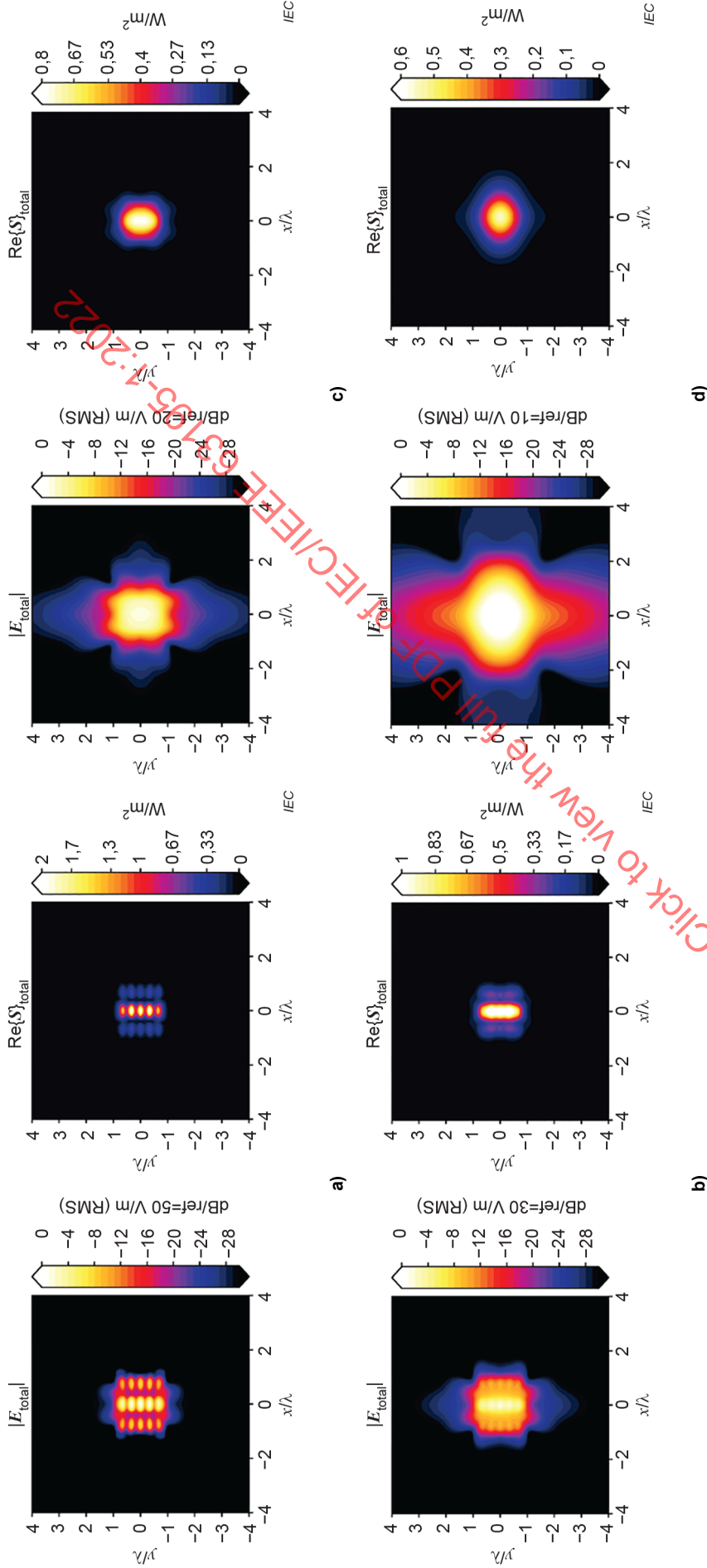


Figure B.9 – 10 GHz patterns of $|E_{\text{total}}|$ and $\text{Re}\{S\}_{\text{total}}$ for the pyramidal horn loaded with a slot array at distances of a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, and d) 50 mm from the upper surface of the slot array

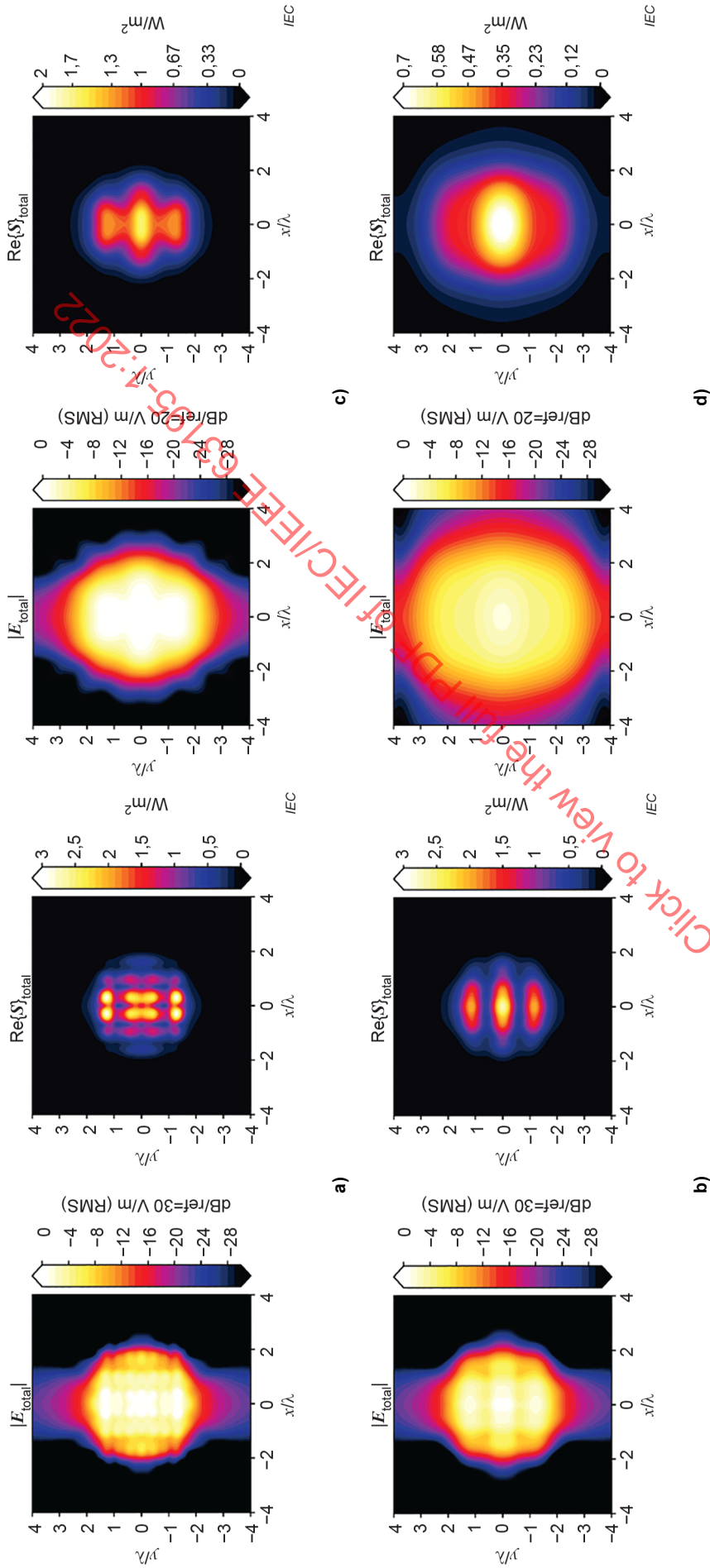


Figure B.10 – 30 GHz patterns of $|E_{\text{total}}|$ and $\text{Re}\{S\}_{\text{total}}$ for the pyramidal horn loaded with a slot array at distances of a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, and d) 50 mm from the upper surface of the slot array

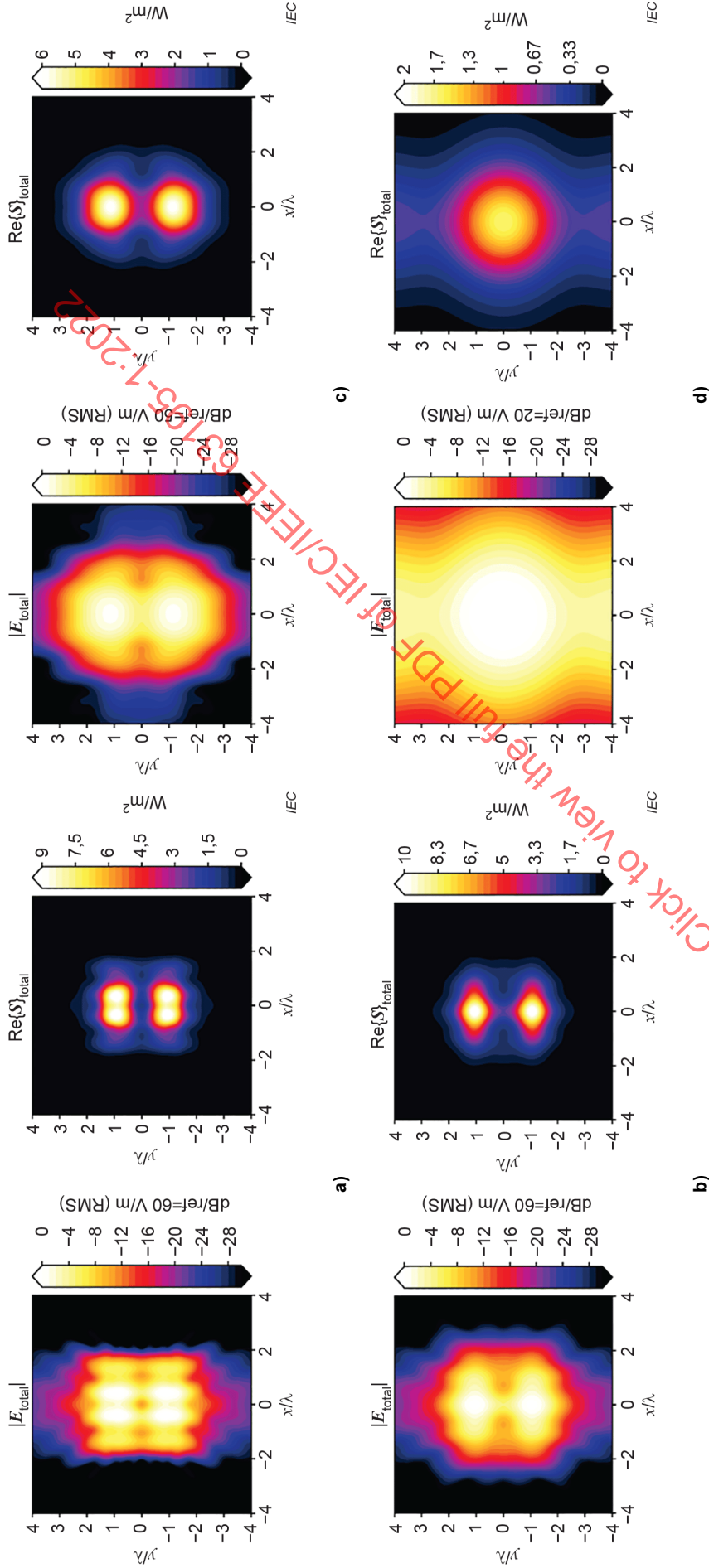


Figure B.11 – 60 GHz patterns of $|E_{\text{total}}|$ and $\text{Re}\{S\}_{\text{total}}$ for the pyramidal horn loaded with a slot array at distances of a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, and d) 50 mm from the upper surface of the slot array

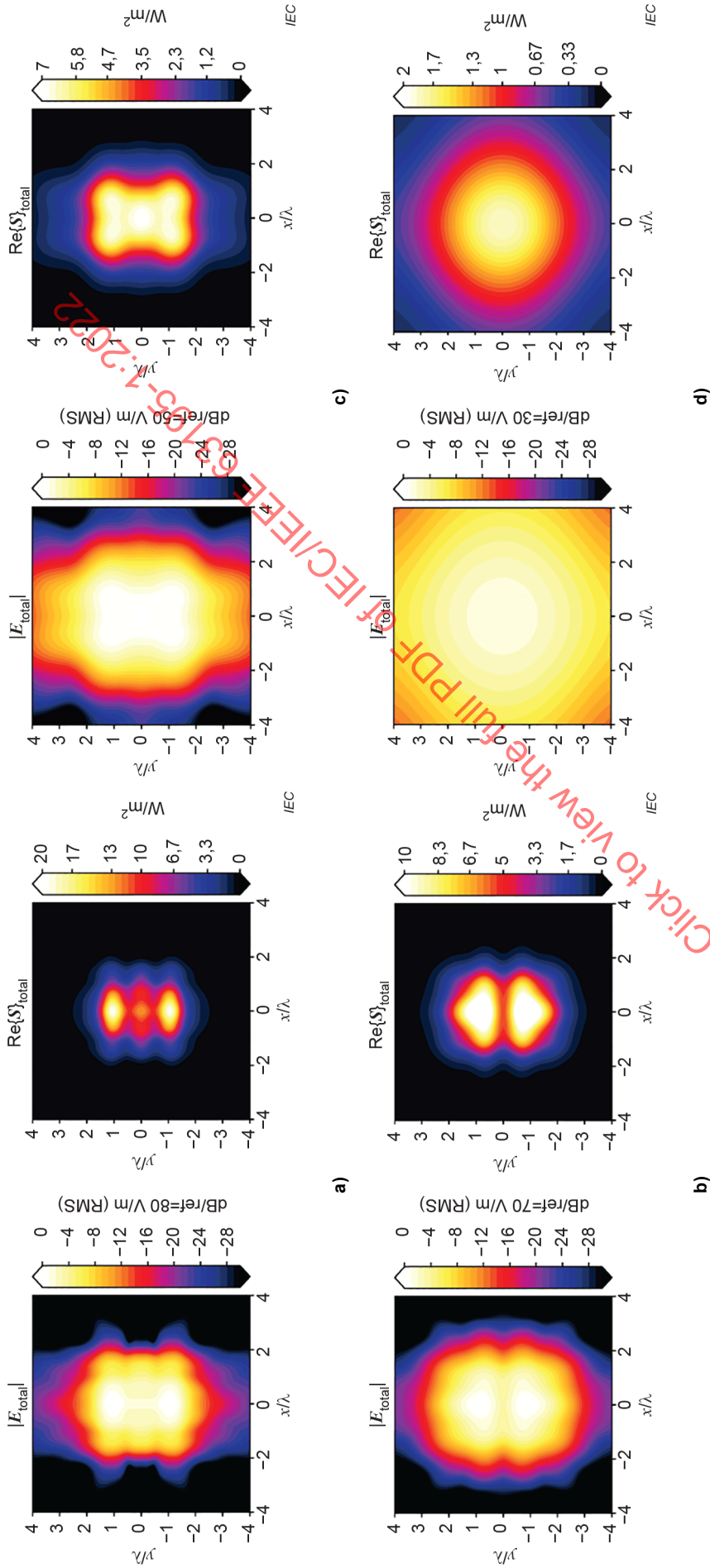
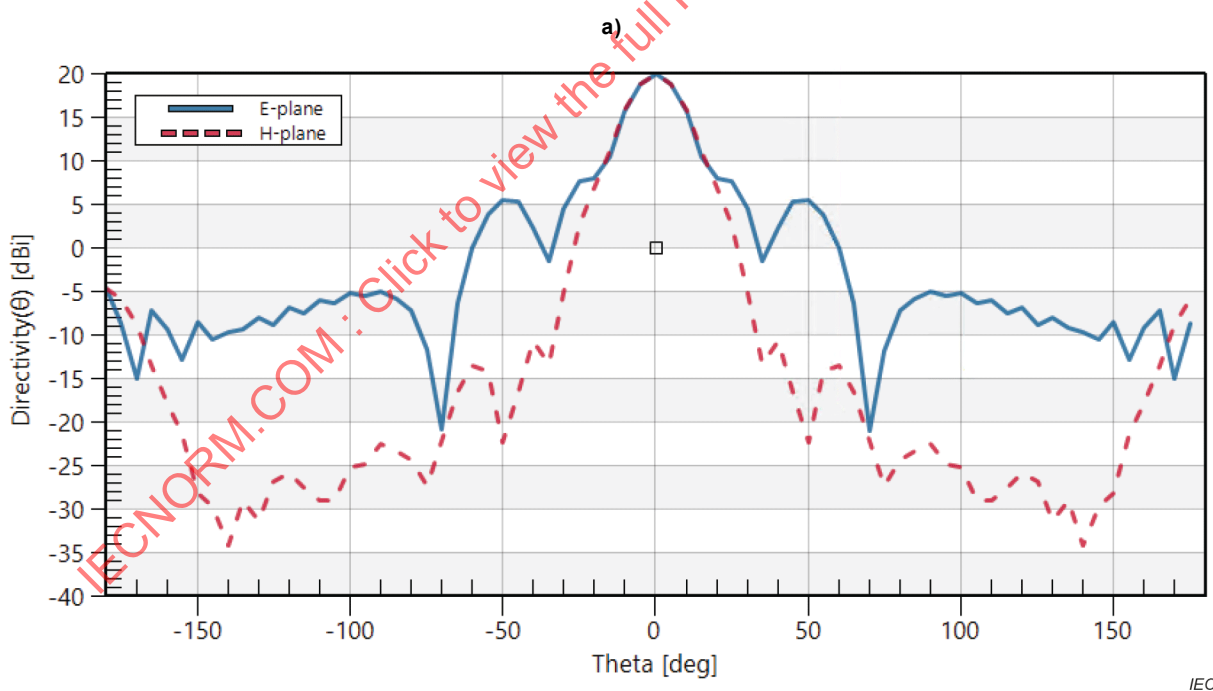
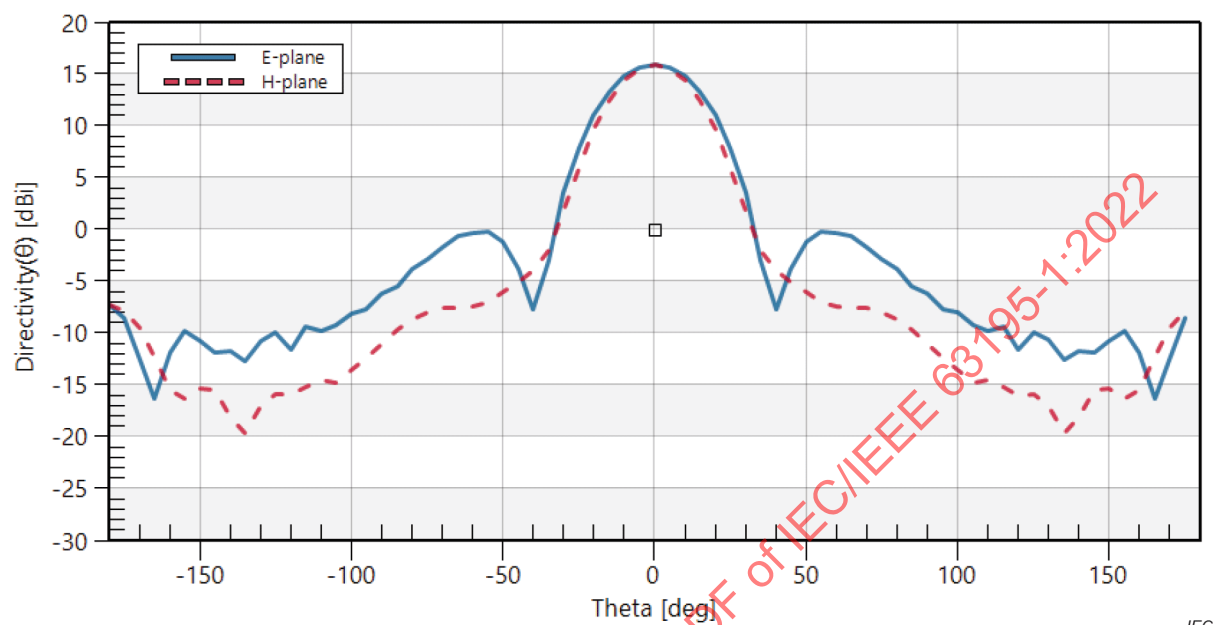


Figure B.12 – 90 GHz patterns of $|E_{\text{total}}|$ and $\text{Re}\{S_{\text{total}}\}$ for the pyramidal horn loaded with a slot array at distances of a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, and d) 50 mm from the upper surface of the slot array

B.4.4 Far-field radiation patterns

The far-field radiation patterns (in terms of the total directivity) are shown in Figure B.13 for the pyramidal horn loaded with a slot array at the operating frequencies of 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz, and 90 GHz.



b)

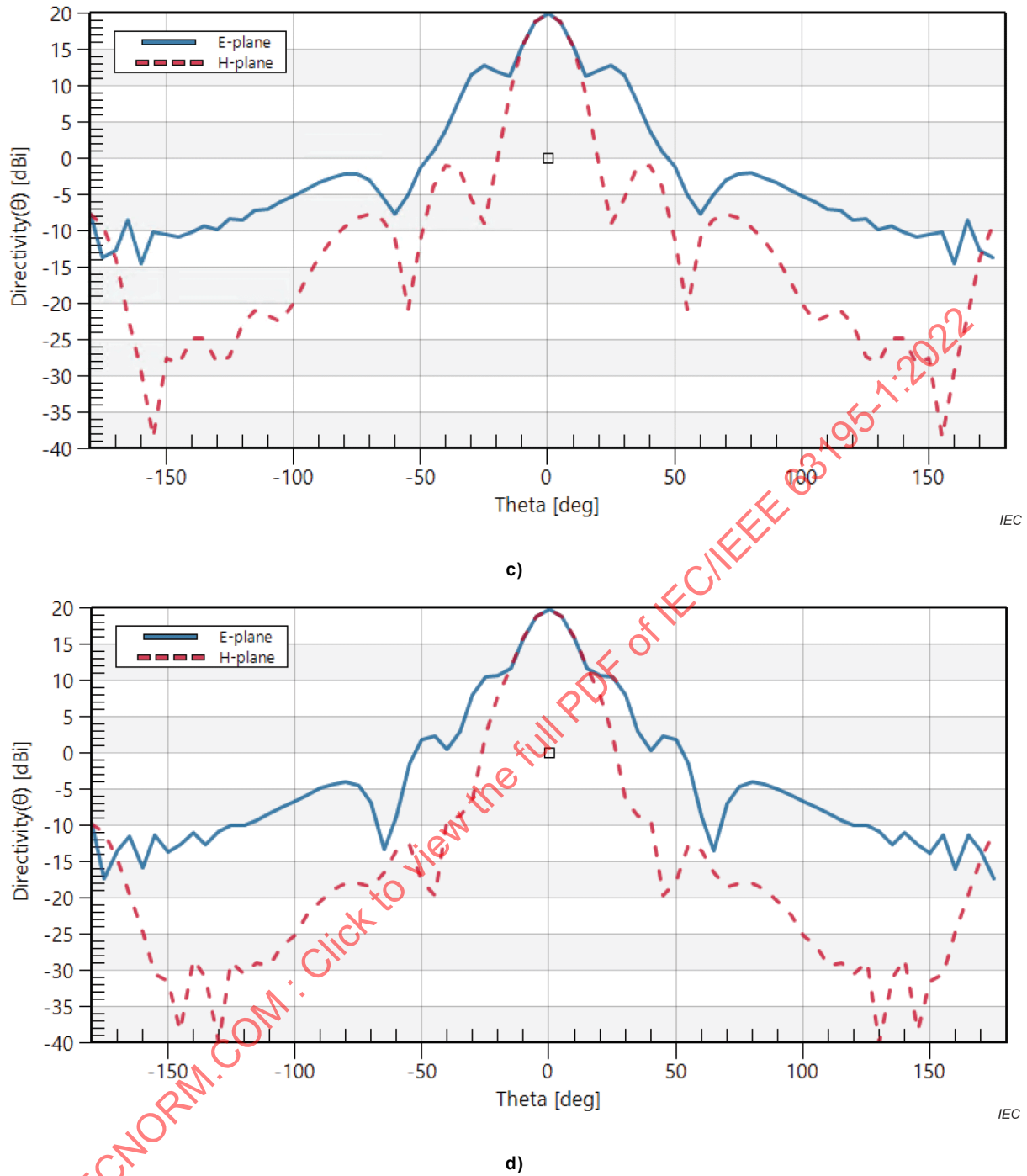


Figure B.13 – Far-field radiation patterns of a) 10 GHz, b) 30 GHz, c) 60 GHz, and d) 90 GHz pyramidal horn loaded with a slot array

B.5 Antenna validation procedure

B.5.1 General

The objective of this procedure is to specify some main validation principles guidance to antenna manufacturers whenever a new antenna is designed and planned to be incorporated into this document as a normative antenna. In the following subclauses, validation principles are presented and briefly described.

B.5.2 Objectives, scope, and usage specifications

For each antenna, specify whether it is a validation antenna, a system-check antenna, etc. A concise description for each antenna shall be provided, justifying how its use strengthens the validation process. Objectives, usage, and operating frequency range for each antenna shall be indicated as well.

B.5.3 Antenna design

For each antenna, detailed drawings of parts, including mechanical dimensions and tolerances, shall be provided. Material references, along with their dielectric properties, shall be provided as well. Materials shall be easily available on the market, and the antenna manufacturer shall indicate at least two producers. High quality CAD files for each antenna shall be provided in different formats (.stl and .stp at minimum) to increase the compatibility with different electromagnetic simulation software packages on the market. CAD files of the antennas shall have sufficient details of construction and parameters so that the numerical targets can be independently verified. CAD files of each antenna shall be as close as possible to the physical antenna. Antenna assembly instructions shall be provided. Antennas should be as close as possible to analytical ones, e.g. waveguides or dipoles.

B.5.4 Numerical targets

CAD files for all specified antenna test configurations shall be provided. Numerically computed power density target values along with complex local electric field at given reference surfaces shall be provided for each antenna test configuration. A comparison campaign using different numerical simulation software packages is necessary to check whether numerical targets are within the uncertainty limits specified in the uncertainty budget.

B.5.5 Reference antennas calibration

Physical antennas shall be measured using a power density measurement system that has a calibration traceable to SI units, to validate the numeric target values.

The calibration setup of reference antenna should use the same equipment as used for power density measurement system calibration in order to reduce uncertainty. If it is not the case, uncertainty shall be determined and considered.

The calibration setup of the reference antenna shall include the power density measurement system with valid calibration parameters for the calibration frequency, calibrated electronics, and the power setup.

The detailed test configuration setup (instruments, powers, frequencies, evaluation surface(s), antenna rotation angles and positions) shall be provided. An interlaboratory comparison campaign (using different measurement systems) is necessary to validate target power density values and complex electric field.

B.5.6 Antenna verification and life expectation

A verification procedure shall be developed for each antenna that indicates the recommended verification steps and their periodicity. Antenna manufacturers shall indicate the expected life cycle and possible precautions one should adopt to improve the durability of the antenna over time.

B.5.7 Uncertainty budget considerations

Detailed uncertainty budget for each antenna shall be provided. For both simulations and measurements, the antenna manufacturer shall identify and list all the major contributors for uncertainty (meshing, antenna position, measurement drift, environment, etc.). Each contributor shall be specified with a probability distribution and factor plus a sensitivity factor.

B.6 Validation procedure for wideband signals

B.6.1 General

The objective of this procedure is to provide guidance for validation of the system performance when wideband modulation signals are used.

The validation procedure includes the following:

- a) wideband signals used for the system validation and system check;
- b) requirements for validation antennas and validation setup;
- c) target values for the validation antennas transmitting the signals specified in a);
- d) assessment of wideband signal uncertainty;
- e) validation procedure.

B.6.2 Validation signals

The wideband performance of the measurement system should be evaluated by comparing the results of CW and wideband modulated signals. Table A.2 (see A.5.3) contains group G4, which includes a 400 MHz wideband signal suitable for testing the wideband modulation response of the system.

B.6.3 Validation antennas and setup

Since wideband signal performance is evaluated, it is important to make sure that the validation antenna has a flat frequency response within the emission bandwidth. Waveguide horn with operating frequency aligned with the centre frequency of the wideband signal is a suitable example. The vector signal generator and the rest of the setup (cabling, adaptors, etc.) should provide a flat frequency response within the emission bandwidth. In order to minimize any mismatch effects, the return loss of the antenna should be sufficient (for example above 20 dB).

The evaluation plane should be above the antenna aperture (e.g. 10 mm) in order to minimize any disturbance on the antenna.

Input power to the antenna is measured using a power sensor. Since CW is compared to a wideband modulated signal, it is important to confirm that the same input power is fed into the antenna in both cases.

B.6.4 Target values for validation antennas transmitting wideband signals

The CW result for the centre frequency of the emission can be used as a target value. The difference between the power density result with CW and with wideband modulated signal according to B.6.2 should be within the measurement uncertainty of the system.

B.6.5 Wideband signal uncertainty

Uncertainty related to the wideband signal (WBS) is due to the variable response of the intrinsic parameters of the probe as a function of frequency. For large bandwidth signals used in 5G FR2, this uncertainty should be quantified.

B.6.6 Validation procedure

The following steps give an example validation procedure.

- a) Measure the antenna input power for CW (M1) and for modulation M8 from Table A.2 (see A.5.3).
- b) Measure the return loss of the validation antenna.
- c) Measure $psPD$ for the CW signal.
- d) Measure $psPD$ for the signal M8.

Compare the results of steps c) and d) and confirm that differences are within the measurement uncertainty of the system.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC/IEEE 63195-1:2022

Annex C

(normative)

Calibration and characterization of measurement probes

C.1 General

This Annex C describes the requirements for calibration of the probe and determination of the calibration measurement uncertainty. The probe should be calibrated together with the measurement system, including readout electronics and data processing algorithms. Calibration of the probe in a setup separate from the measurement system is allowed if it can be demonstrated that the setup gives the same results as the measurement system. This includes having an identical interface between the probe and the readout electronics.

Probes for power density measurement include the following types:

- waveguide probes;
- electric scalar or vector probe(s);
- magnetic scalar or vector probe(s).

Subclauses 6.3 and 6.5 provide the requirements for the probes and scanning system.

NOTE Further information on calibration of electromagnetic field sensors and probes is found in IEEE Std 1309-2013 [23].

C.2 Calibration of waveguide probes

C.2.1 General

Waveguide probes are non-isotropic, in general, and either used as scalar or phasor probes. If a waveguide probe is intended to measure not only amplitude but also (relative) phase in the measurement region, the influence of the measurement drift and the component noise shall be considered (see 7.4.4 and 8.4.14).

Calibration of a waveguide probe can be performed by placing it in a reference field (e.g. with reference E-field or H-field amplitudes, or reference power density) with uncertainty that shall be well characterized (an example is in Clause C.5). The reference field may be experimentally determined or calculated based on the geometry of the field generator [22]. The reference field should be a locally-homogeneous field, at least relative to the waveguide aperture size, and the reactive near-field of the source should be avoided to ensure that the probe does not influence the field generator.

C.2.2 Sensitivity

The probe shall be calibrated across its operating frequency range. The repeatability of the resulting sensitivity should be checked so that it is within the reproducibility uncertainty.

C.2.3 Linearity

The linearity response of the probe under calibration shall be characterized over its dynamic range. Linearity shall be confirmed for the intended range settings if the probe has multiple ranges or gain settings. It shall also be verified that the linearization applies over different signal characteristics (modulations) used by the DUT. After checking the linearity response of the probe, the linearity correction should be applied for removing the linearization error.

C.2.4 Lower detection limit

The lower detection limit is the minimum local PD measurable within the overall system uncertainty. It is related to the noise level and offset (phase and amplitude) of the measurement system, and may be assessed by varying the output power in the same setup as described here (i.e. by verifying that the probe is still responding linearly (phase and amplitude) at the required lower detection level).

C.2.5 Isotropy

The hemispherical isotropy shall be assessed by either tilting the probe or changing the polarization of the reference wave. The angles of incidence should be determined by separation distance from DUT and the probe, but within the range from 90° (axial) to 0° (normal).

C.2.6 Response time

The response time of the field sensor or probe is defined as the time required for the response to indicate 90 % of the steady state field value, with the field applied as a step function [22]. If the probe remains stationary at each measurement location for at least three times the assessed response time, an uncertainty related to the response time can be negligible. Otherwise, the uncertainty due to signal response-time uncertainty shall be assessed using the signal characteristics of the test device.

C.3 Calibration for isotropic scalar E-field or H-field probes

C.3.1 General

The purpose of this clause is to establish a standard procedure for assessment of sensitivity, isotropy, linearity, lower detection limit and response time of scalar E-field or H-field probes at frequencies above 6 GHz.

Calibration shall be performed in a locally-homogeneous field (with a field variation no greater than $\pm 0,2$ dB over a spherical region with a diameter of at least 5 probe diameters) that has been characterised with low uncertainty (e.g. by using experimental and/or numerical techniques). Calibration in the reactive near-field of the source should be avoided in order to ensure that the probe does not influence the source. Examples of suitable setups include GTEM cells and waveguide horns. Probe calibration inside a waveguide is typically not possible at these frequencies because the waveguide dimensions are too small relative to the probe size.

C.3.2 Sensitivity

The probe shall be calibrated across its operating frequency range. The resulting sensitivity is determined from the average sensitivity over the probe rotation in the hemisphere for full isotropy.

After calibration, check that the repeatability is within the reproducibility uncertainty provided in the uncertainty budget (e.g. $< 0,1$ dB).

C.3.3 Isotropy

The probe shall be exposed to a reference wave with varying angles of incidence with respect to the plane normal to the probe axis. The hemispherical isotropy shall be determined by either tilting the probe or changing the polarization of the reference wave. The angles of incidence shall vary from 90° (axial) to 0° (normal) with a step size less than or equal to 30°. For each incidence angle, the probe shall be rotated through a range of 360° and a step size less than or equal to 15°.

C.3.4 Linearity

The linearity response of the probe under calibration shall be characterised over its dynamic range. Linearity shall be confirmed for the intended range settings if the probe has multiple ranges or gain settings. It shall also be verified that the linearisation applies over different signal characteristics (modulations) used by the DUT. After checking the linearity response of the probe, the linearity correction should be applied for removing the linearisation error.

C.3.5 Lower detection limit

The lower detection limit is the minimum local PD measurable within the overall system uncertainty. It is related to the noise level and offset of the measurement system and may be assessed by varying the output power in the same setup as described here (i.e. by verifying that the probe is still responding linearly at the required lower detection PD level).

C.3.6 Response time

Field-probe signal response time uncertainty is evaluated by exposing the probe to an E-field or H-field step response producing at least 10 W/m^2 . The signal response time is determined as the time required by the probe and its readout electronics to reach 90 % of the expected final value produced by the step response through switching the RF power on and off. The probe shall remain stationary at each measurement location for at least three times the assessed response time to ensure a negligible probe signal response time uncertainty. Under these measurement conditions, an uncertainty value of zero may be used. Otherwise, the uncertainty due to signal response-time uncertainty shall be assessed using the signal characteristics of the test device. In this case, the signal step-response time uncertainty is equal to the percentage difference of the PD measured with the chosen measurement time from the PD measured with a measurement time of at least three times the assessed response time. A rectangular probability distribution shall be assumed.

C.4 Calibration of phasor E-field or H-field probes

C.4.1 General

The purpose of this clause is to establish standard procedures for assessment of sensitivity, isotropy, linearity and lower detection limit of phasor E-field or H-field probes in the frequency-domain at frequencies covered by this document. Phasor E-field or H-field probes are usually designed for use as reference antennas for measuring the incident near-field of an antenna under test. In the near-field, the measured time-domain radio-frequency signals of the probe are the result of the coupling product between the probe and the antenna under test. The calibration procedure of phasor probes essentially consists in characterising the probe receive-functions that relate the measured signals to the relevant component(s) of the vector phasor of the incident E-field or H-field at the locations of the probe scanning points.

The calibration procedure should include probe-compensation to correct for the probe relative pattern, cross-coupling of the sensors, and polarization ratio so to achieve sufficiently low isotropy uncertainty over a hemispherical solid angle toward the DUT [22]. Calibration shall be performed in locally homogeneous fields that have been characterised with low uncertainty (e.g. by using experimental and/or numerical techniques). Examples of suitable setups include GTEM cells and waveguide horns.

Recommended properties for near-field phasor probes, as well as for their associated calibration procedures are provided in [22].

C.4.2 Sensitivity

The probe shall be calibrated across its operating frequency range. The resulting sensitivity is determined from the average sensitivity over the probe rotation in the hemisphere for full isotropy.

C.4.3 Isotropy

The probe shall be exposed to a reference wave with varying angles of incidence with respect to the plane normal to the probe axis. The hemispherical isotropy shall be determined by either tilting the probe or changing the polarization of the reference wave. The angles of incidence shall vary from 90° (axial) to 0° (normal) with a step size less than or equal to 30°. For each incidence angle, the probe shall be rotated through a range of 360° and a step size less than or equal to 15°.

C.4.4 Linearity

The frequency-domain response of the sensor and the measurement system shall be linearized over the system dynamic range and over all the frequency points of the system analysis bandwidth and frequency range prior to the assessment of the sensitivity. This is best performed using an amplitude or power scan with a well-specified incident field of CW signal. The dynamic range of interest is assessed in steps of 3 dB or less. It shall also be verified that the system linearity applies for different signal characteristics (modulations) used by the DUT. A true RMS power meter or an appropriately calibrated field probe should be used as reference.

C.4.5 Lower detection limit

The lower detection limit is the minimum local PD measurable within the overall system uncertainty. It is related to the noise level and offset of the measurement system and can be assessed by varying the output power in the same setup as described here (i.e. by verifying that the probe is still responding linearly at the required lower detection PD level).

C.5 Calibration uncertainty parameters

C.5.1 General

The methodology for determining the uncertainty terms as indicated in C.5.2 to C.5.7 shall be adapted to the specifications of the specific system.

C.5.2 Input power to the antenna

Input power to the antenna is measured using a power sensor. The power sensor has calibration uncertainty that affects the absolute power level. The power sensor also has power drift, and noise. At millimetre wave frequencies, the insertion losses of adaptors are significant and shall be considered. This contribution is the estimated uncertainty from the specified or measured insertion loss. The coupling to the source is affected by the following items that lead to an amplitude ripple:

- power sensor, absolute;
- power sensor, drift;
- power sensor, noise;
- power sensor, connector repeatability;
- waveguide adaptor loss.

C.5.3 Mismatch effect (input power measurement)

The output power of the source into the horn antenna is of interest to calculate the path loss at the calibration point. The mismatch effect in this context is the difference of the measured power using adaptors (instead of antenna) compared to the power available if the antenna would be mounted.

When a monitoring antenna is used, a similar mismatch effect is present during the power measurement at the monitoring horn. Because the power sensor and in some cases part of the configuration is identical for the feed power and the monitored power, the two figures should be combined into one. The evaluation is different for the bands.

The measurement ripple in the setup between direct power measurement and monitoring horn power measurement should be extracted by taking the differences from the monitoring horn power to the direct power measurement with compensation of the average path loss. It is a superposition of a slow ripple (caused by the source match) and a fast ripple (caused by the external setup, the presence of the horn and residual reflections from side lobes reflected by metallic parts).

C.5.4 Gain and offset distance

C.5.4.1 External reflections

When measuring the power decay with distance, the presence of the receive horn in the setup causes a fast ripple to be present. During the field measurement, the reflections from the monitoring horn are not present (c_i is set to 0).

C.5.4.2 Offset distance and gain calculation

The offset distance is assumed to be very smooth due to the use of standard gain horns. Numerical simulations of the horns may be made to verify the variation and smoothness. A second-order to third-order polynomial is used to approximate the gain and the offset distance. This distance error (for fixed gain) and the gain (for given distance) are correlated in the propagation equation. The deviation of the polynomial fit from the expected simulated frequency response is used here.

C.5.4.3 Positioning, lateral

The field variation in the boresight deviates from the ideal homogeneous field. In the far-field, residual reflections from the probe environment can cause a pattern from reflections. The value at the bore sight can therefore vary. Evaluate the uncertainty due to positioning by scanning the probe over a realistic range of calibration locations, taking into consideration positioning uncertainty.

C.5.5 Signal spectrum

C.5.5.1 Frequency precision

The frequency uncertainty shall be assessed. The use of frequency multipliers might affect the uncertainty of the set frequency.

C.5.5.2 Harmonic suppression

The signal generation with multipliers can contain harmonics and spurious emissions that shall be assessed. The harmonics of a waveguide band will be outside the transmit waveguide band. Without specific harmonic filters, they will also be radiated, however not necessarily in the fundamental mode of the waveguide and pyramidal antenna. The gain for the higher frequencies is typically also higher, but not specified for these frequencies.

C.5.5.3 Spurious emissions

The effect within the same band is less enhanced than harmonics. The in-band harmonics depend on the architecture of the multiplier / extender. For extenders with separated multipliers, the suppression is better.

C.5.6 Setup stability

C.5.6.1 Power drift over time

Power drift over time and repeatability in the same setup (same equipment, cables, adaptors, horns) shall be evaluated, applying a rectangular distribution. Improved stability can be achieved by inserting a waiting time to allow stabilization of the power after equipment warm-up.

C.5.6.2 Power drift over temperature

During calibration, the laboratory temperature shall be controlled within the requirements of 6.2. The influence of temperature on calibration shall be evaluated by repeat measurements.

C.5.7 Uncertainty for field impedance variations

The sensitivity of the probes system for different field impedances shall be evaluated for local field impedances that may be present in the closest locations of the measurement region. In the near-field, the magnitude of impedance can vary between 4 Ω and 4 000 Ω .

C.6 Uncertainty budget template

An example uncertainty budget template is shown in Table C.1.

Table C.1 – Uncertainty analysis of the probe calibration

Uncertainty contributor	Unc. value $\pm$ dB	Probability distribution	div.	c_i^a	Std. unc. (dB)		v_i or v_{eff}^b
Target field determination							
Incident power:							
– input power							
– power sensor, absolute		N ($k = 2$)	2	1			
– power sensor, drift		N	1	1			
– power sensor, noise		R	1,73	1			
– power sensor, connector repeatability		R	1,73	1			
– waveguide adaptor insertion loss		R	1,73	1			
– mismatch effect (input power measurement)		U	1,41	0,5			
Target E-field correction (compensation of systematic dev)		R	1,73	1			
Gain and offset distance calculation:							
– external reflections (presence of horn)		U	1,41	0			
– calculation of offset distance and gain		U	1,41	1			
– positioning, lateral		R	1,73	1			
Signal spectrum:							
– frequency precision		R	1,73	1			
– harmonic suppression		R	1,73	1			
– spurious suppression, in-band		R	1,73	1			
Setup stability:							
– power drift over time		R	1,73	1			
– power drift over temperature		R	1,73	1			

Uncertainty contributor	Unc. value ± dB	Probability distribution	div.	c_i^a	Std. unc. (dB)		ν_i or ν_{eff}^b
Uncertainty for local field impedance variations:							
Probe system		R	1,73	0,5			
Probe linearity		R	1,73	1			
Probe lower detection limit		R	1,73	1			
Combined standard uncertainty							
Expanded uncertainty ($k = 2$)							
N – normal probability distribution; R – rectangular probability distribution; U – U-shaped probability distribution. ^a c_i is the sensitivity coefficient. ^b ν_i or ν_{eff} are the degrees of freedom in the standard uncertainty $u(x_i)$ for the input estimate x_i, and the degree of effective freedom in combined uncertainty $u(x_i)$, used to obtain $t_{\text{tp}}(\nu_{\text{eff}})$, respectively.							

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC/IEEE 63195-1:2022

Annex D (informative)

Information on use of square or circular shapes for power density averaging area in conformity evaluations

D.1 General

This Annex D discusses the difference in averaging areas between square and circular shapes, which are used to derive the spatial-average power density (sPD) over an evaluation surface A_{av} .

The difference between the square and circular shapes (or the square-like and circular-like shapes) is minor, typically only a few percent, and in rare cases at most approximately $\pm 10\%$. The spread in $psPD$ obtained for different orientations of the square averaging area, confirm that rotation of the averaging area is necessary to find the maximum value of $psPD$; this procedure can be completed by post-processing.

D.2 Method using computational analysis

Computational simulations were performed using the Method of Moments (MoM) at several frequencies from 30 GHz to 100 GHz. Patch array antennas with 2×2 and 1×4 elements were used as sources. Each element was excited with equal amplitude and phase. The sPD was derived from Formula (7) (see 6.7.1.2) for averaging areas of 1 cm^2 and 4 cm^2 , and separation distances between the antenna and evaluation surface ranging from 1 mm to 100 mm. Spatial resolutions used to derive sPD were 1 mm, 0,5 mm, and 0,2 mm at 30 GHz, 60 GHz, and 100 GHz, respectively.

The antennas were rotated up to 90° from the initial set position as shown in Figure D.1. The maximum value of sPD over the square shape was derived for each antenna positioning.

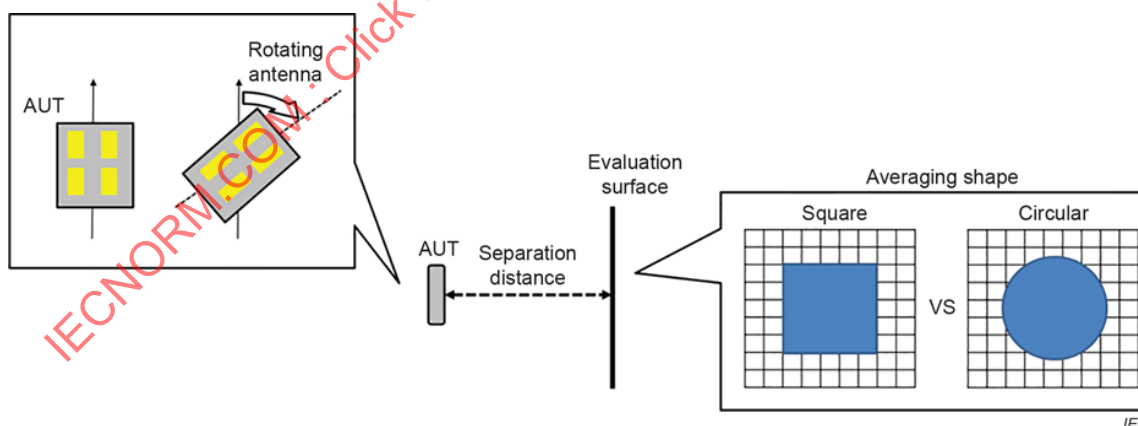


Figure D.1 – Schematic view of the assessment of the variation of sPD using square shape by rotating AUT (antenna under test)

D.3 Areas averaged with square and circular shapes on planar evaluation surface

Figure D.2 shows the ratio between $psPD$ when averaged over squares compared with the circle as a function of the separation distance from each antenna. The solid lines in the figure are given by the mid-range of $psPD$ for square averaging shape while the vertical bars represent the range of the spread values by rotating the antenna.

As shown in Figure D.2, the spread in $psPD$ obtained for different orientations of the square averaging area, confirm that rotation of the antenna is necessary to find the maximum value of $psPD$. The spread values are equivalent to those when the averaging area is rotated at any antenna set position, and the procedure for finding the maximum value of $psPD$ by the different orientations of the square averaging area can be completed in the post-processing using the PD distribution on the evaluation surface.

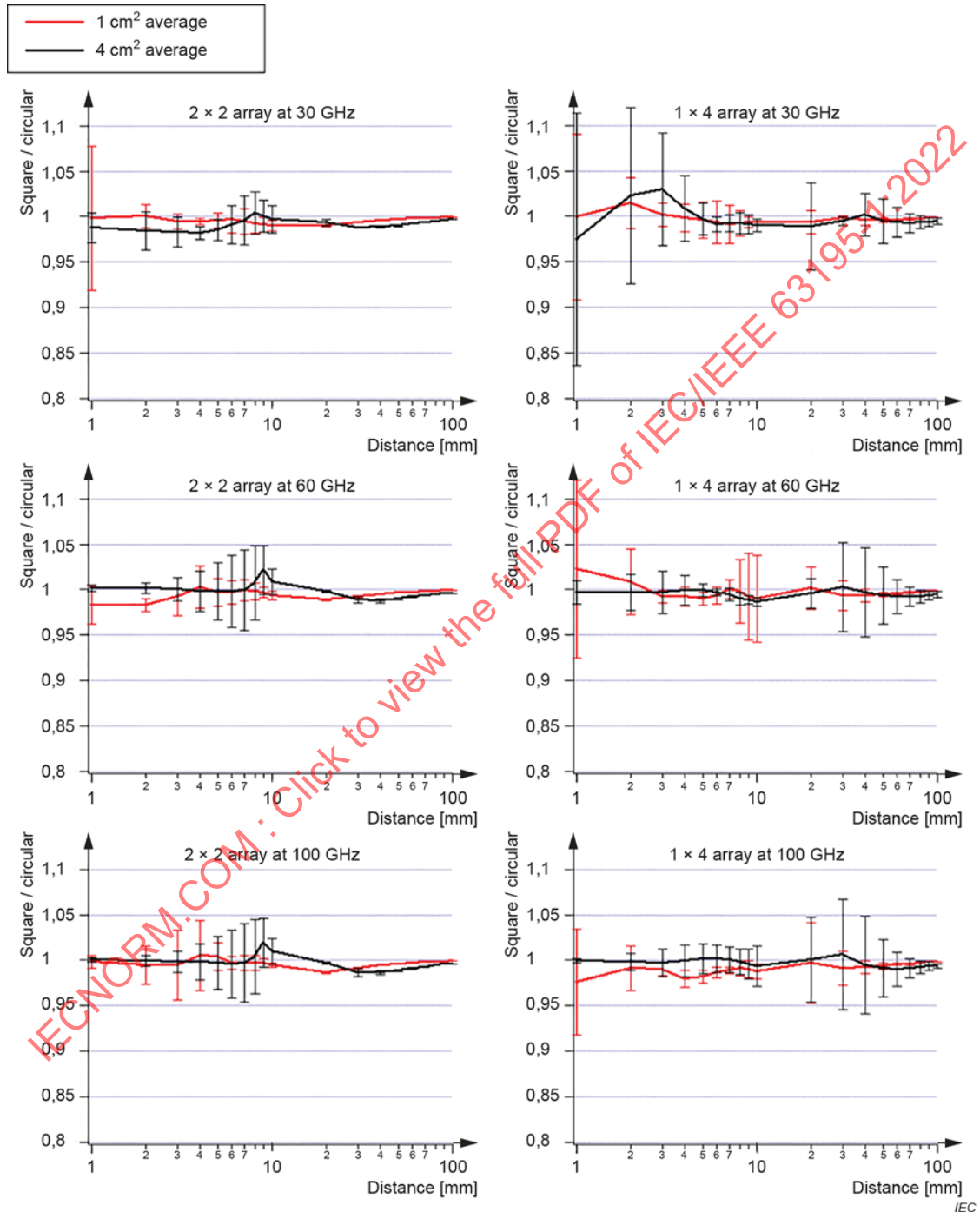


Figure D.2 – Comparison of $psPD$ averaged using square versus circular shaped areas on planar evaluation surfaces

D.4 Areas averaged with square and circular shapes on nonplanar evaluation surface

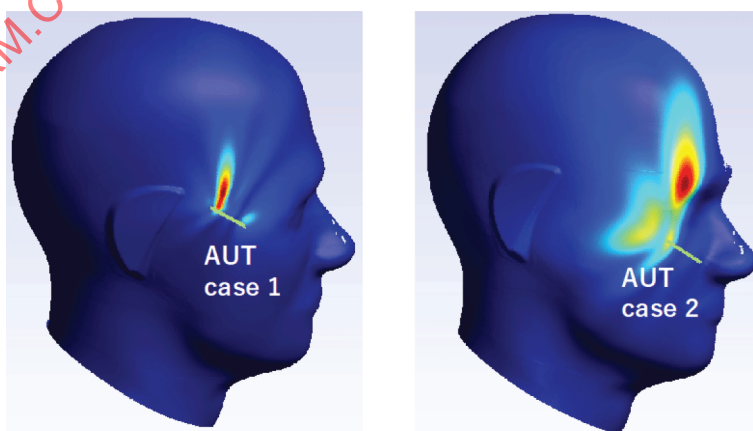
Computational simulations similarly as for Clause D.2 were performed at 30 GHz, and $psPD$ was evaluated on a nonplanar evaluation surface, i.e. device next to the ear evaluation surface (see 7.2.4.3). An array antenna with 1×4 elements was used as the source. The weights defining the amplitude and phase excitations for each antenna element are shown in Table D.1. The antenna was placed close to the temple region considering a next to the ear device position: cases 1 and 2 in Figure D.3. The sPD was derived using Formula (7) (see 6.7.1.2) for averaging areas of 1 cm^2 and 4 cm^2 .

The values of $psPD$ with averaging area of A were compared between two averaging shapes. One is circular-like shape that is constructed as the intersection of a sphere with a radius $\sqrt{A/\pi}$; see details in 8.4 of IEC/IEEE 63195-2:2021. The other is square-like shape that is constructed as the intersection of a cube with an edge length a ; the edge length is adjusted so that total area intersecting the cube is within 2 % of the value of A . Here, the spread in $psPD$ is obtained for different orientations of the averaging area constructed as the intersection of a cube. The cube was rotated around the surface normal passing through its centre point, up to 85° with resolution of 5° , referring to the procedure for planar evaluation surface in 8.4.2.1 of IEC/IEEE 63195-2:2021.

Figure D.4 shows the ratio between $psPD$ when averaged over square-like shapes compared with the circle-like shape at each antenna set position with each set of phase shift. The vertical bars represent the range of the spread values by rotating the cube for determining averaging area.

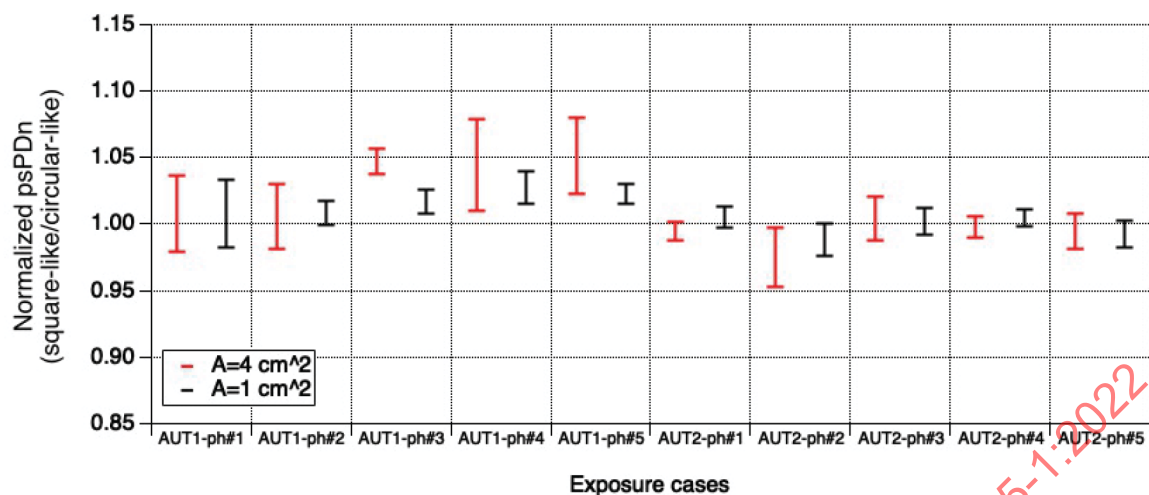
Table D.1 – Phase shift values for the array antenna

No.	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4
#1	1	1	1	1
#2	1	$e^{\pi/2}$	e^{π}	$e^{3\pi/2}$
#3	1	$e^{-\pi/2}$	$e^{-\pi}$	$e^{-3\pi/2}$
#4	1	$e^{\sqrt{3}\pi/2}$	$e^{\sqrt{3}\pi}$	$e^{3\sqrt{3}\pi/2}$
#5	1	$e^{-\sqrt{3}\pi/2}$	$e^{-\sqrt{3}\pi}$	$e^{-3\sqrt{3}\pi/2}$



IEC

Figure D.3 – Example PD distributions with device next to ear evaluation surface



IEC

Figure D.4 – Comparison of $psPD$ averaged using cube cross-section (square-like) versus sphere cross-section (circular-like) shaped areas for device next to ear evaluation surface

Annex E (informative)

Reconstruction algorithms

E.1 General

Reconstruction algorithms are applied to transform the measured fields to the power density at the evaluation surface. In the near-field, this transformation requires amplitude and phase of all E-field and H-field vector components. Reconstruction algorithms include one or more of the following techniques:

- extraction of field details from measured data, e.g. computation of field phases from their amplitudes, calculation of vector components, or estimation of the H-field from the E-field (or vice versa);
- forward transformation (propagation) of the fields if the evaluation surface is farther from the DUT than the measurement region;
- backward transformation (propagation) of the fields if the evaluation surface is closer to the DUT than the closest measurement region.

The analytical reference functions described in Clause E.5 allow a validation of the reconstruction algorithms whatever reconstruction technique and measurement methodology are employed.

E.2 Methodologies to extract local field components and power densities

E.2.1 General

The input for these reconstruction algorithms is E-field information, H-field information, or both. Electromagnetic fields are complex values (amplitude and phase) having six degrees of freedom: corresponding to the amplitude and phase of each E-field and H-field vector component. However, Maxwell's equations in a source-free, homogeneous, linear, non-magnetic, and isotropic medium reduce to the vector Helmholtz equation with four degrees of freedom. Therefore, in order to determine the electromagnetic field, it is sufficient to measure any two independent complex field components, e.g. the magnitude and phase of two orthogonal E-field components, provided that the measurements are suitable for the selected method. For example, the measurement points need to fulfil sampling and domain extent requirements to compute the plane wave spectrum if the missing quantities are to be computed in the spectral domain.

Often the two complex components of the E-field are used as measured data, and the missing quantities are computed using plane wave spectrum relations. Likewise, it is possible to measure two or three components of the H-field and derive the E-field from these, or even measure all the components of the electromagnetic field directly.

All these approaches are theoretically equivalent and the choice of one over the other depends exclusively on the technical solutions available, and on their efficiency, accuracy and sensitivity to measurement noise.

E.2.2 Phase-less approaches

It is known that one of the advantages of an electromagnetic field reconstruction method based on Maxwell's equations is the uniqueness of their solution. Such methods utilize the complex-valued field-phasor. If the phases of the E-field or H-field or both cannot be measured directly, they can be numerically reconstructed from multiple measurements of the field amplitudes, using, for instance, interferometric or iterative procedures such as the Gerchberg-Saxton algorithm [24], or its variant by Anderson and Sali [25], which recovers the phases from amplitude measurements on two parallel planes. The reconstructed phase data can then be used, with the amplitude information, as input for either field expansions or inverse source methods. The errors from phase reconstruction algorithms should be considered in the uncertainty budget.

When phase information is not available from field measurements, it can be numerically reconstructed taking into account some a priori knowledge about the radiated fields, or from multiple measurements of the field amplitudes. For that, interferometric or iterative procedures such as the Gerchberg-Saxton (error-reduction) algorithm [24], or its derivatives that recover the phases from amplitude measurements on two scanning surfaces (Bucci et al. [26]) can be used. The use of two different probe antennas allows only one scanning surface to be sufficient for reconstruction (Pierri et al. [27]). The convergence of iterative methods largely depends on the proximity of the initial guess to the correct phase distribution. The reconstructed phase data can then be used, with the amplitude information, as input for either field expansions or inverse source methods. Amplitude measurement inaccuracies may result in reconstruction errors. The errors from phase reconstruction algorithms should be considered in the uncertainty budget.

E.2.3 Approaches using E-field polarization ellipse measurements

As a variant of phase-less approaches, reconstruction algorithms can operate on E-field polarization ellipses measurement results. To determine the polarization ellipse, the relative phases of all field components are found from the amplitude measurements at different angular positions. Knowing polarization information improves convergence to the correct phase distribution and reduces uncertainty by placing additional constraints on the phase reconstruction problem.

This approach has been described by Pfeifer et al. [28], [29] using miniaturized minimally perturbing probes, i.e. RF transparent probes, for measuring E-field amplitudes and deriving the polarization ellipse very close to the surface of DUTs, even in the reactive near-field. This has the advantage of not having to solve the inverse problem of backward transformation (propagation). Measurements can be made at the location of human exposure. The approach has been used and validated for power density reconstruction in the close near-field ($> \lambda/5$) at millimetre-wave frequencies [4].

E.2.4 Direct near-field measurements

Advancements in probe technology, such as probes that are miniaturized or non-metallic or both, can considerably lower the perturbations on the DUT, thus making the role of reconstruction algorithms less crucial. Therefore, a scenario should not be excluded in which direct near-field measurements on the evaluation surface will be possible, with limited post-processing or none at all. In the latter case, the uncertainty budget will not contain contributions from reconstruction algorithms, only errors of the measurement setup.

E.3 Forward transformation (propagation) of the fields

E.3.1 General

The most common application of forward transformation (propagation) is to compute the far-field from near-field measurements. However, the near-field in the region between measurement location and far-field can also be of interest. It is thus key to sample all of the significant radiation from the DUT during the near-field measurements. Different techniques are available for forward transformation, which commonly fall into one of two main groups, field expansion methods and field integral equation methods. Recently, methods that operate in the close near-field have been developed (e.g. see Pfeifer et al. [28], [29]; Figure E.1).

The near-field measurement accuracy poses higher requirements on the probes because they shall be minimally-disturbing, i.e. causing minimal scattering or being RF transparent. Subclause 8.5.1 addresses the uncertainty due to probe coupling with the DUT. If this uncertainty component is significant, or if any proximity sensors are unintentionally activated or de-activated during testing (see 7.2.3) either the proximity sensor needs to be forced into activation or de-activation, as appropriate, or the measurement needs to be taken in a distance at which the proximity system is not affected and backward propagation techniques applied (Clause E.4).

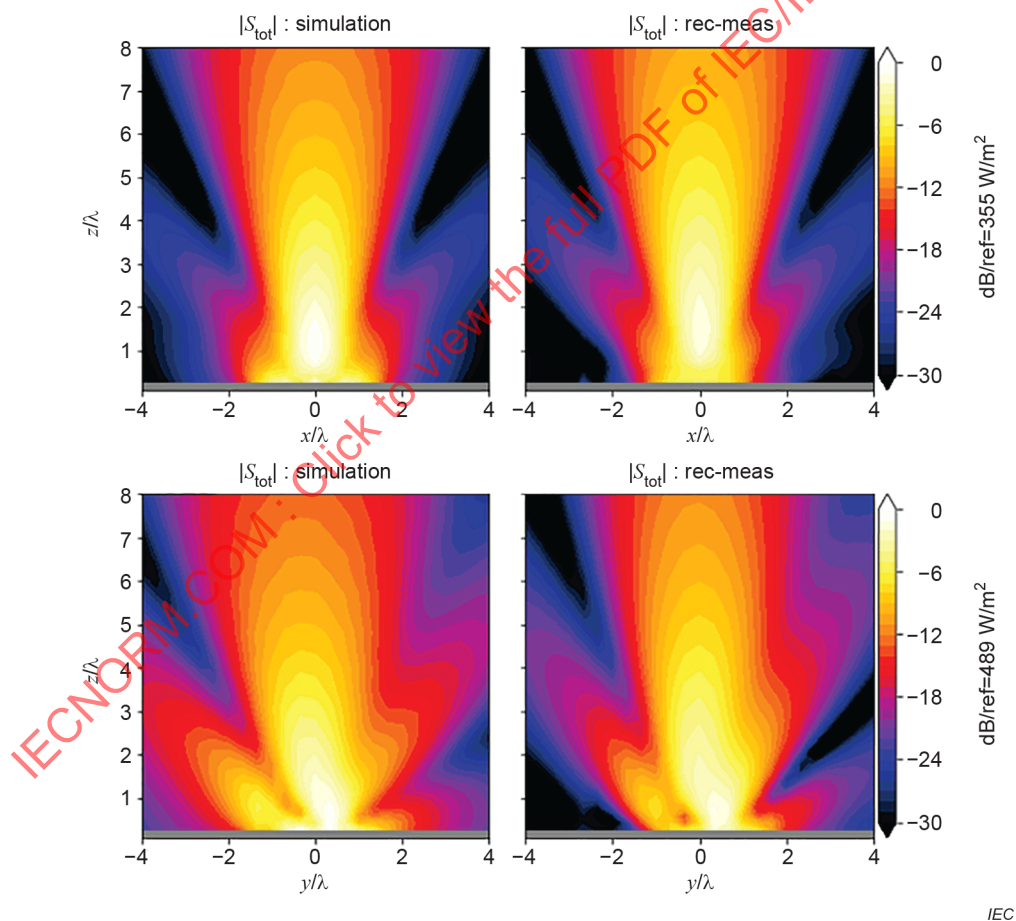


Figure E.1 – Simulation (left) and forward transformation from measurements applying methods described in [29] (right) of power density in the xz -plane (above) and yz -plane (below) at a distance of 2 mm for a cavity-fed dipole array at 30 GHz (see Annex B)

E.3.2 Field expansion methods

E.3.2.1 General

The measured data in the measurement region(s) are expanded in terms of modes, i.e. according to a basis of solutions of the vector wave equation. The basis for the expansion is chosen in order to have the basis functions orthogonal on the measurement region; hence expansions in planar, spherical, or cylindrical waves can be used depending on the measurement region. On the other hand, the choice of the measurement region is typically dictated by the DUT characteristics and by the measurement requirements. It is possible to pass from one basis to another, for example from a spherical wave expansion to a plane wave expansion as reported by Cappellin et al. [30].

Among the basis expansions mentioned, the plane wave spectrum (PWS) decomposition (also known as angular spectrum decomposition) is, at present, the most widely used for the assessment of human exposure to RF fields.

E.3.2.2 The plane wave expansion

The plane wave expansion decomposes the field into basis functions (plane waves) with known propagation across space as described by Balanis [31]. The field in successive planes can be efficiently computed with the two-dimensional Fast Fourier Transform (FFT). Therefore, the plane wave expansion method is not as computationally expensive as integral equation methods that calculate the field at each observation point. The errors in the field reconstruction using the PWS are directly related to the size of the measurement region. Furthermore, as the field propagates, the number of spatial samples necessary for the FFT computation needs to change proportionally to the propagation distance, so that aliasing errors are avoided. It can be accomplished using Fresnel transform [32]. The field expansion errors should be included in the uncertainty budget.

A typical plane wave expansion algorithm utilizing the spectral propagator includes the following steps.

- a) Let P_0 be the measurement region plane. The E-field (or H-field) on P_0 is measured in amplitude. Phase is either measured or reconstructed in accordance with E.2.3 or E.2.4. P_0 should be chosen parallel to the target plane (evaluation surface) P_1 .
- b) The measured values are converted into spectral domain and forward propagated to the target plane P_1 using plane wave expansion (e.g. by means of a discrete Fourier transform).
- c) The vector E (or H) fields are converted into space-time domain by means of an inverse discrete Fourier transform. The spectral components corresponding to the evanescent waves can be neglected due to their limited effect on the computed fields (Wang [33]).

E.3.3 Field integral equation methods

Field integral equations or radiation integrals relate the surface current density over a closed surface and the radiated electromagnetic field at any location outside that surface. This can be used for forward transformation (propagation) as follows.

Equivalent magnetic and electric surface equivalent current densities can be computed from E-field and H-field amplitude and phase (either measured or reconstructed, as described in E.2.3 or E.2.4) using the field equivalence principles [34].

For time-harmonic electromagnetics, the electric field integral equations (EFIE) or magnetic field integral equations (MFIE) can be used to compute the radiated electromagnetic field at any point in space (outside the surface for which the current densities are computed) [31]. The equivalent electric and magnetic current densities need to be known on a closed surface in general, which can be truncated for practical applications where field (and surface current) contributions are negligible. For computation of the far-field, the equations can be simplified (e.g. Quijano and Vecchi [35]).

In contrast to field expansion methods, there are no fundamental constraints on the structure of the measurement locations, and the field can be evaluated at any point in space outside the surface for which the equivalent current densities are computed.

E.4 Backward transformation (propagation) of the fields

E.4.1 General

Forward transformations as described in Clause E.3 are well posed. Backward transformation (propagation) is unstable and ill-posed, but equivalently important in the context of this document.

On the other hand, for many of the measurement systems currently in use, the impact of the proximity of the probes to the DUT can become quantitatively severe, to the point of jeopardizing the reliability of the results, when the measurements need to be taken close to the DUT. In these cases probe-correction technique algorithms are necessary. In order to minimize the impact of probe proximity to the DUT, backward-transformation methodologies have been recently developed and tested by Lundgren et al. [36], Scialacqua et al. [37], and Sasaki et al. [38]. These techniques allow for direct measurement of both field amplitude and phase, avoiding uncertainties due to phase reconstruction.

Conceptually the measurements are simpler, because measurements are not taken at larger distance from DUT and not in the close near-field. The field probe does not have to be RF transparent and interference with the proximity sensor system can be excluded (if the distance is larger than the reach of the proximity sensor) and does not need to be investigated. The quantities of interest in proximity of the DUT at the evaluation surface are determined by computational methods. However, such type of operation is a mathematically ill-posed problem: while a function mapping near-field into far-field exists, as described in Clause E.3, it is in practice not invertible.

In the literature this class of problems is known as inverse problems, and it has been an active field of research for decades in both the applied mathematics and engineering communities. Inverse problems do not admit exact (closed-form) solutions, but only approximated ones. Consequently, numerous methods and approaches have been proposed (e.g. Alvarez et al. [39], Persson and Gustafsson [40] and Hansen [41]), each one with its own merits and drawbacks depending on the specific problem and on the details of each algorithm. Mapping of the measured fields to a surface closer to the DUT often requires therefore the use of regularization techniques, the uncertainty of which needs to be included in the uncertainty budget.

The existing approaches to address inverse problems in electromagnetics can be divided in two main groups, field expansion methods ([20]) and source reconstruction (or inverse source) methods ([41], [42], [43]), which are described in E.4.2 and E.4.3, respectively.

E.4.2 Field expansion methods – the plane wave expansion

Field expansion methods, as described in E.3.2, can be applied for forward and backward transformations. The plane wave spectrum (PWS) decomposition is at present the most widely used in the domain of human exposure assessment to RF fields.

Mathematically, it is straightforward to perform the plane wave expansion described in E.3.2.2 towards the DUT (backward transformation). In this case, however, determining evanescent waves from the field data is an unstable process producing exponentially large errors in the PWS decomposition from arbitrarily small field errors.

The plane wave expansion method is still a widely used approach in the framework of the assessment of human exposure to radiation from wireless devices. It consists in measuring time-independent electromagnetic fields, in amplitude and phase, on a measurement plane at a distance from the DUT large enough so that the perturbations caused by the measurement system become negligible. The measured values are then backward-transformed, by means of a reconstruction algorithm, to the position where the electromagnetic field actually needs to be assessed.

In the harmonic regime, PD can be expressed as the real part of the complex Poynting vector; it is worth recalling that the time-averaged value of the Poynting vector represents the flow of electromagnetic energy through a given surface element during a considered period of time. At short distances (fraction of a wavelength) from a source, the reactive part of the E-field and H-field might contribute to the time-averaged Poynting vector (although it does not contribute to the TRP). In other words, if backward transformation (propagation) is applied to the near-field from measurements in the far-field, the reactive field components cannot be reconstructed using the PWS. This is because evanescent modes have decayed in the far-field [44], [45]. The error introduced by back-projection needs to be characterized.

E.4.3 Inverse source methods

An alternative to backward transformation using the plane wave expansion is a source reconstruction approach. It is the inverse of the problem described in E.3.3: given (from measurements) the radiated field outside a surface, reconstruct the equivalent current densities on the surface. This problem is also referred to as inverse source problem, which, in addition to antenna measurements, arises in many scientific and industrial areas such as biomedical imaging, tomography, transport equations, etc. As a consequence, these methods have been extensively studied and it would be hardly possible to list all the algorithms and variations which have been developed.

In the EM domain, the input data for the problem are typically the complex values of the electric field, radiated from the DUT, tangent to a given measurement region surface. The primary output data are electric or magnetic equivalent currents on an open or closed reconstruction surface, which is typically chosen to be in the vicinity of the DUT. These equivalent currents, which radiate the same field as the one being measured at the measurement points, are then used as sources to calculate the complex EM field radiated from the DUT in the space region of interest.

The main technical difficulty is to obtain the equivalent current distributions from the radiated field data. The electric field integral equation (EFIE), magnetic field integral equation (MFIE), or the combined field integral equations (CFIE) are first discretized using Method of Moments [39], [46]. For that, the unknown currents can be approximated by a set of basis functions, with the pulse, triangular or Rao-Wilton-Glisson basis functions being the most popular choices. The resulting system of linear equations $Ax = b$ is then solved by, for example, the Conjugate Gradient Iterative method. The CFIE-based formulation of the problem is known to be the most general one yielding a more stable solution with higher reconstruction accuracy [47].

Mathematically, this is an ill-posed problem. If the phase is known (i.e. measured) for the input data, the problem is linear.

If only amplitude measurements are available for the input data, the problem becomes a non-linear optimization problem. However, even in the linear case, the matrix A remains ill-conditioned and therefore a regularization procedure is required. Among the most used mathematical approaches it is worth mentioning singular value decomposition (SVD), L^2 , L^1 , L^0 minimizations, Tikhonov regularization, and Morozov regularization [48].

In contrast to field expansion methods, these methods do not place requirements on the shape and structure of the evaluation surface or the location of the measurement data. However, the discretization of the surface with equivalent currents, and the quality and location of the measurement data, can have a large effect on the resulting equivalent currents.

E.5 Analytical reference functions

The analytical reference functions are field distributions that satisfy Maxwell's equations and verify laws of electromagnetic field propagation. The general analytical formula for the reference complex vector electric $E(r)$ and magnetic $H(r)$ fields that are radiated by the elementary electric dipole moments $p(r')$ are according to Formula (E.1) and Formula (E.2):

$$E(r) = \sum_{r'} \nabla_r \left\{ \nabla_r \left[p(r') \frac{e^{-jk_0|r-r'|}}{4\pi|r-r'|} \right] \right\} + k_0^2 p(r') \frac{e^{-jk_0|r-r'|}}{4\pi|r-r'|} \quad (\text{E.1})$$

$$H(r) = \sum_{r'} \frac{-j}{2\pi\mu_0 f} k_0^2 \left[\nabla_r \left(\frac{e^{-jk_0|r-r'|}}{4\pi|r-r'|} \right) \times p(r') \right] \quad (\text{E.2})$$

where

$r(x,y,z)$ is the field observation point;

$r'(x',y',z')$ is the location of the elementary dipoles;

p is the dipole moment specified in $\mathbb{C}^3$ space with $p \cdot \hat{x}$, $p \cdot \hat{y}$, $p \cdot \hat{z}$.

The files listing the locations and $p \cdot \hat{x}$, $p \cdot \hat{y}$, $p \cdot \hat{z}$ moments of the elementary dipoles are available at:

<https://www.iec.ch/tc106/supportingdocuments>

<https://standards.ieee.org/downloads.html>

Table E.1, Table E.2, and Table E.3 show the list of available reference functions and $psPD$ target values.

Table E.1 – List of analytical reference functions and associated $psPD_{n+}$ target values

Frequency [GHz]	Associated file (*.fct)	Antenna description	Evaluation surface at 2 mm		Evaluation surface at 5 mm	
			$psPD_{n+}$ 1 cm ² [W/m ²]	$psPD_{n+}$ 4 cm ² [W/m ²]	$psPD_{n+}$ 1 cm ² [W/m ²]	$psPD_{n+}$ 4 cm ² [W/m ²]
30	1_ref_func_mmw_30GHz.fct	Simplified Cavity Fed Dipole Array	0,871	0,733	0,986	0,632
60	2_ref_func_mmw_60GHz.fct	Simplified Cavity Fed Dipole Array	0,949	0,331	0,793	0,291
30	3_ref_func_mmw_30GHz.fct	Simplified Slot Array	0,988	0,931	1,06	0,987
60	4_ref_func_mmw_60GHz.fct	Simplified Slot Array	0,991	0,707	1,03	0,682
30	5_ref_func_mmw_30GHz.fct	LEAT Antenna_Linear Array 4 Square Patches	0,952	0,345	0,768	0,307

Table E.2 – List of analytical reference functions and associated $psPD_{tot+}$ target values

Frequency [GHz]	Associated file (*.fct)	Antenna description	Evaluation surface at 2 mm		Evaluation surface at 5 mm	
			$psPD_{tot+}$ 1 cm ² [W/m ²]	$psPD_{tot+}$ 4 cm ² [W/m ²]	$psPD_{tot+}$ 1 cm ² [W/m ²]	$psPD_{tot+}$ 4 cm ² [W/m ²]
30	1_ref_func_mmw_30GHz.fct	Simplified Cavity Fed Dipole Array	1	0,829	1,04	0,679
60	2_ref_func_mmw_60GHz.fct	Simplified Cavity Fed Dipole Array	1	0,400	0,798	0,318
30	3_ref_func_mmw_30GHz.fct	Simplified Slot Array	1	0,939	1,08	0,999
60	4_ref_func_mmw_60GHz.fct	Simplified Slot Array	1	0,714	1,04	0,691
30	5_ref_func_mmw_30GHz.fct	LEAT Antenna_Linear Array 4 Square Patches	1	0,393	0,801	0,342

Table E.3 – List of analytical reference functions and associated $psPD_{mod+}$ target values

Frequency [GHz]	Associated file (*.fct)	Antenna description	Evaluation surface at 2 mm		Evaluation surface at 5 mm	
			$psPD_{mod+}$ 1 cm ² [W/m ²]	$psPD_{mod+}$ 4 cm ² [W/m ²]	$psPD_{mod+}$ 1 cm ² [W/m ²]	$psPD_{mod+}$ 4 cm ² [W/m ²]
30	1_ref_func_mmw_30GHz.fct	Simplified Cavity Fed Dipole Array	1,136 3	0,924 1	1,089 8	0,712 8
60	2_ref_func_mmw_60GHz.fct	Simplified Cavity Fed Dipole Array	1,042 4	0,419 1	0,828 9	0,328 4
30	3_ref_func_mmw_30GHz.fct	Simplified Slot Array	1,019 0	0,952 9	1,089 3	1,008 7
60	4_ref_func_mmw_60GHz.fct	Simplified Slot Array	1,014 8	0,727 2	1,050 9	0,699 3
30	5_ref_func_mmw_30GHz.fct	LEAT Antenna_Linear Array 4 Square Patches	1,081 5	0,428 2	0,832 6	0,358 6

Annex F (normative)

Interlaboratory comparisons

F.1 Purpose

The purpose of the interlaboratory comparison is to compare validated power density measurement systems by comparing results from several different laboratories. The general concept is to use reference devices such as reference sources or DUTs. The assessment methodologies described in Clause 7 are used.

The measured data from various laboratories shall be compared. Also, a comparison of measurement uncertainty analyses among the test laboratories shall be performed. If the differences and discrepancies between the measured data can be attributed to differences in the measurement uncertainties for ($k = 2$), the interlaboratory comparison is deemed to be successful. If not, all sources of uncertainties shall be investigated according to the recommendations of Clause 8. Also, other possible sources of uncertainties different from those specified in Clause 8 shall be considered.

NOTE General guidelines for accomplishing interlaboratory comparison tests are given, for example, in ISO/IEC 17043:2010 [49].

F.2 Reference devices

Reference devices are well specified and stable sources (e.g. sources like the validation sources of Annex B) or commercial wireless DUTs that are maintained and distributed in accordance with, for example, ISO/IEC 17043:2010 [49]. The designation of the supplier is based on agreement between the participants.

F.3 Power setup

The reference devices are preferably delivered with their own stable power sources to avoid differences due to different power setups. If not, the power setup is dependent on the precision of the forward and reflected power and the appropriate instrumentation shall be available at the laboratory performing the tests as well as a carefully determined uncertainty budget. If the source is powered by a battery, it shall be fully charged.

F.4 Interlaboratory comparison – procedure

Measurement procedures for power density assessment used in the interlaboratory comparison are the same as those used for conformity testing in accordance with Clause 7 on surfaces as specified in the round-robin protocol. Each laboratory shall provide a full test report in accordance with the requirements of Clause 9.

Results of the interlaboratory comparison shall be compared to their respective target values. Each result shall fall within the combined expanded uncertainty of the measured value and target value. The reports from different laboratories are to be evaluated and compared by the designated monitor laboratory.

Annex G (informative)

PD test and verification example

G.1 Purpose

This Annex G provides links to example PD measurement reports of a commercially available DUT. This example is used to illustrate the PD test methods, including verification and simultaneous transmission assessment.

G.2 DUT overview

The example DUT is a commercially available handset (US Federal Communications Commission ID (FCC ID): A3LSMG986U⁴) supporting 3GPP 5G NR FR2 [22] operation in bands n260 and n261.⁵

G.3 Test system verification

A system verification is performed using a verification source operating at 30 GHz. It consists of a horn antenna fed by a stable signal generator, all built in a compact housing. The measured power density values in [50] are compared to the ones listed in the calibration certificate in accordance with the test system specification. Historical validation results are provided too. The deviation is shown to be within the expanded uncertainty specified by the manufacturer (in this case $\pm 0,66$ dB).

G.4 Test setup

The measurement setup is shown in reference [51].

G.5 Power density results

The device contains multiple millimetre-wave antenna arrays, which cannot transmit simultaneously. The PD results for these (including different beams and DUT surfaces) can be accessed through reference [50].

G.6 Combined exposure (Total Exposure Ratio)

The DUT contains multiple transmitters that may operate simultaneously, and therefore requires a simultaneous transmission analysis. The Total Exposure Ratio (TER) analysis can be found under [52].

⁴ FCC ID A3LSMG986U is an example of a suitable product available commercially. This information is given for the convenience of users of this document and does not constitute an endorsement by IEC or IEEE of this product.

⁵ Operating band n260 is 37 GHz to 40 GHz, and n261 is 27,5 GHz to 28,35 GHz.

Annex H (informative)

Applicability of plane-wave equivalent approximations

H.1 Objective

The goal of this Annex H is to demonstrate that the far-field boundary as specified in Derat [16] is valid for the purposes of conformity testing.

H.2 Method

To determine the minimum evaluation distance between a DUT's antenna and the evaluation surface (3.2.3) at which a plane-wave equivalent approximation applies, the following antenna designations are used.

- Cavity-fed dipole arrays operating at 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz, and 90 GHz: CDA10G, CDA30G, CDA60G and CDA90G.
- Pyramidal horns with slot arrays operating at 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz, and 90 GHz: SH10G, SH30G, SH60G, and SH90G.

Using FDTD-simulated fields, the spatial-average power density sPD_{tot} (6.7.1.3) and the spatial-average plane-wave equivalent power density sPD_{pwe} are computed according to Formula (H.1) and Formula (H.2).

$$sPD_{\text{tot}}(r) = \frac{1}{2A_{\text{av}}} \iint_{A_{\text{av}}} \|\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*\| dA \quad (\text{H.1})$$

$$sPD_{\text{pwe}}(r) = \frac{1}{A_{\text{av}}} \iint_{A_{\text{av}}} S_{\text{pwe}} dA = \frac{1}{2\eta_0 A_{\text{av}}} \iint_{A_{\text{av}}} \|\mathbf{E}_{\perp}\|^2 dA = \frac{1}{2\eta_0 A_{\text{av}}} \iint_{A_{\text{av}}} \|\mathbf{H}_{\perp}\|^2 dA \quad (\text{H.2})$$

Where time-harmonic fields are assumed and $\mathbf{E}$ and $\mathbf{H}$ are the corresponding electric and magnetic vector fields, η_0 is the free-space wave impedance (3.2.7). $\mathbf{E}_{\perp}$ and $\mathbf{H}_{\perp}$ are the transverse components of the electric field and magnetic field with respect to the normal vector of the evaluation surface. Using a circular averaging-area (3.2.1) $A_{\text{av}} = 1 \text{ cm}^2$, the peak values of sPD_{tot} and sPD_{pwe} are expressed with Formula (H.3) and Formula (H.4):

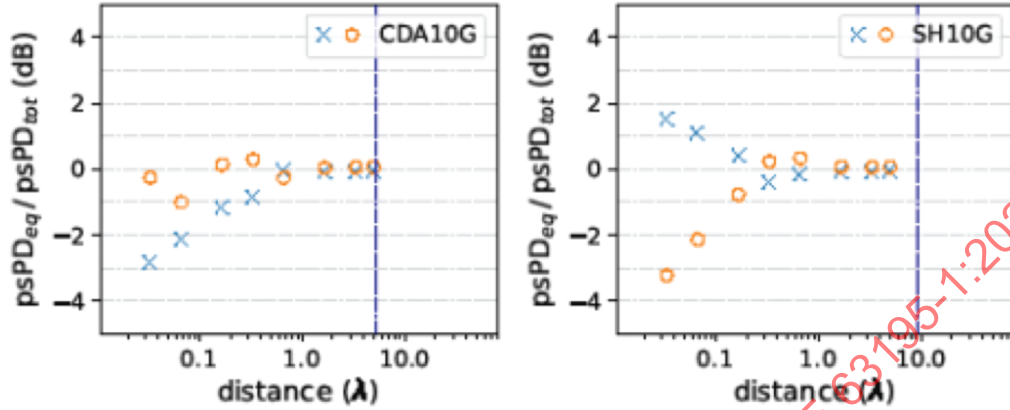
$$psPD_{\text{tot}} = \max\{sPD_{\text{tot}}(\mathbf{r})\} \quad (\text{H.3})$$

$$psPD_{\text{pwe}} = \max\{sPD_{\text{pwe}}(\mathbf{r})\} \quad (\text{H.4})$$

H.3 Results

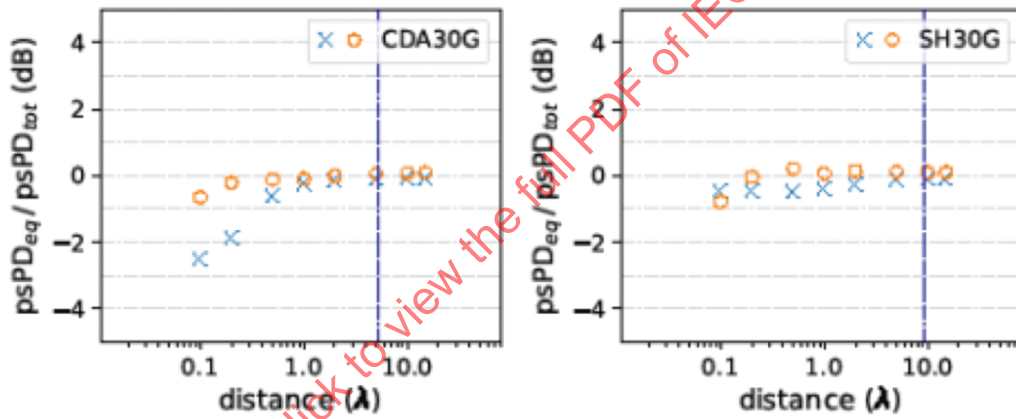
Figure H.1 shows the ratio between sPD_{pwe} and sPD_{tot} for the above-listed antennas as a function of their distances $d = \{1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 150\}$ mm to the evaluation surface. At each evaluation distance, sPD_{pwe} and sPD_{tot} are computed on planar $(16\lambda)^2$ evaluation surfaces sampled at a resolution $\lambda/16$, in order to capture more than 95 % of the TRP (3.4.5) for each antenna.

To get a sense of the minimum evaluation distance at which the plane-wave equivalent approximation (3.1.6) might still hold, the far-field (3.2.11) distance using Formula (18) (see 7.4.2.1) is indicated (vertical dashed-line). The ratio $psPD_{pwe}$ to $psPD_{tot}$ is computed using both the electric (crosses) and magnetic (circles) fields to estimate sPD_{pwe} .



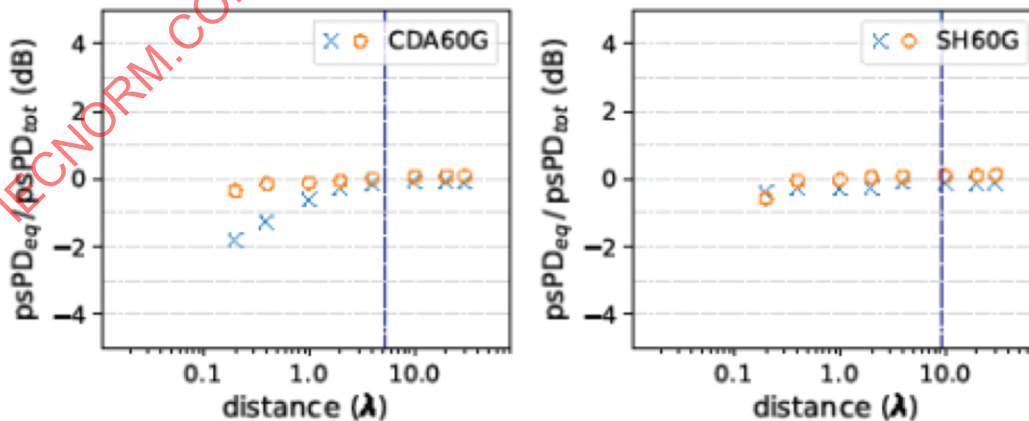
IEC

a) 10 GHz



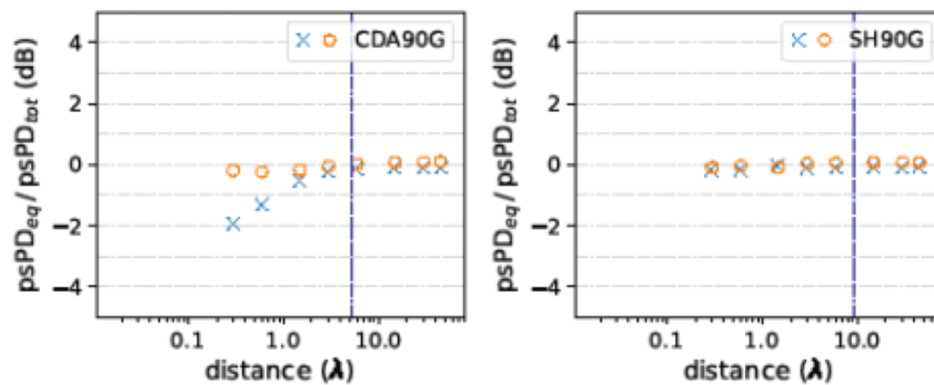
IEC

b) 30 GHz



IEC

c) 60 GHz



d) 90 GHz

NOTE Vertical dashed-lines indicate the far-field distance of each antenna. $psPD_{pwe}$ is computed using the electric field (crosses) and magnetic field (circles).

Figure H.1 – $psPD_{pwe} / psPD_{tot}$ as function of distance (in units of λ) from cavity-fed dipole array (CDA##G, left-side) and pyramidal horn with slot arrays (SH##G, right-side) operating at 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz, and 90 GHz

H.4 Discussion

The evaluation results show that the far-field boundary as specified in Derat [16] is valid for the purpose of conformity testing, i.e. the distance is conservative.

Annex I (informative)

Rationales for concepts and methods applied in this document and IEC/IEEE 63195-2

I.1 Frequency range

This document and IEC/IEEE 63195-2 cover a frequency range from 6 GHz to 300 GHz. At the lower end of this frequency range, the user of a wireless device operating at a distance of only a few millimetres from the body may still be exposed to the reactive or radiative near-field. In such cases, particular considerations for conservatively assessing the exposure based on the evaluation of the incident power density or the Poynting vector in free space may be necessary (I.2.1). For increasing frequencies, the spatial extent of the near-field range decreases, and far-field exposure conditions prevail. Under far-field conditions, the incident field and the plane-wave equivalent power density correlate straightforwardly with the absorbed/epithelial power density, with much reduced requirements on the measurement equipment. Consequently, the upper limit of the frequency range for the scope of this document and IEC/IEEE 63195-2 can be specified as equal to the upper limit of the exposure guidelines [2], [3]. Provided that the measurement equipment is specified for frequencies up to 300 GHz, the methods described in this document and IEC/IEEE 63195-2 can be applied up to this frequency. No particular considerations are required for the numerical techniques if they fulfil the requirements in Clause 5 of IEC/IEEE 63195-2.

I.2 Calculation of sPD

I.2.1 Application of the Poynting vector for calculation of incident power density

Like the SAR limits for frequencies up to 6 GHz, the new basic restrictions [2], [3] for higher frequencies were specified to limit the RF induced temperature increase in body tissue. Because the penetration depth of the electromagnetic energy is much shorter at millimetre wave frequencies, the dosimetric assessment of the basic restrictions in biological tissue or in tissue simulating material poses technical difficulties that still need to be fully addressed.

NOTE The development of methods for the experimental assessment of the absorbed or epithelial power density in body tissue is currently being considered within the framework of a new standard or amendments to this document and IEC/IEEE 63195-2. The development of these assessment procedures will presumably take at least two years from the publication of this document and IEC/IEEE 63195-2.

The exposure guidelines [2] and [3] directly correlate the basic restrictions with the reference levels in terms of the incident power density. This correlation is straightforward for the far-field of the DUT. Concerning exposure in the near-field, [2] states that "...within the reactive near-field the quantities applied for the reference level values are treated as inadequate to ensure compliance with the basic restrictions [and that in] such cases, compliance with the basic restrictions must be assessed ..." and proposes that "... information from a technical standards body, designed to specify external exposures for each EMF source type to more adequately match the basic restrictions, should be utilized to improve reference level assessment procedures." [Reproduced with permission.]

Recent publications indicate that increased absorption relative to perpendicular incidence (TEM-polarization) occurs for TM-polarized waves at the Brewster angle [53], [54], [55]. The resulting increase in absorption can be considered by including all three vector components of the propagating part of the Poynting vector in calculations of incident power density. Reference [56] demonstrates for a set of canonical antennas that power density transmitted into the skin can be conservatively assessed for frequencies above 10 GHz if the calculation of incident power density also considers the imaginary parts of the Poynting vector, i.e. exposures in the reactive near-field.

Additional research has been carried out, investigating the correlation between induced tissue heating and incident power density, and considering surface-normal propagating power density and total propagating power density. The correlation is evaluated statistically [57].

The observations of [2] regarding exposure in the near-field, as well as the conclusions reported in [57], have been considered. Given the continued research and refinement of the dosimetric assessment of basic restrictions at millimetre wave frequencies, this document includes three different expressions for the calculation of the sPD that all converge to a conservative assessment of induced temperature increase in body tissue when exposures approach far-field conditions with normal incidence:

- a) surface-normal propagating power density into the evaluation surface (6.7.1.2), which considers the real part of the surface-normal component of the Poynting vector orientated towards the inside of the evaluation surface;
- b) total propagating power density into the evaluation surface (6.7.1.3), which considers the real parts of the three components of the Poynting vector orientated towards the inside of the evaluation surface, and takes into account the increased absorption at the Brewster angle [53], [54], [55];
- c) total power density into the evaluation surface considering reactive near-field effects (6.7.1.4), which considers the real and the imaginary parts of the three components of the Poynting vector, yielding a conservative estimate in the reactive near-field [56].

1.2.2 Averaging area

According to the ICNIRP [2] and IEEE ICES [3] exposure guidelines, the incident power density is averaged over a square-shaped averaging area for comparison with the reference levels. On a planar surface, the construction of a square shape, including the subsequent requirement for determining the exposure maximum by rotating the square, is straightforward and can be implemented in a computationally efficient way. For curved surfaces, such as those of the human body (e.g. SAM shape for exposure of the head), there is no specified method for mapping a square shape to the surface while retaining all of its geometrical characteristics. The mapping and the subsequent determination of the maximum requires significant computational processing, and implementation is currently regarded as too complex and error-prone.

Due to the limited time between the publication of the new exposure guidelines and the development of these new IEC/IEEE exposure assessment standards, including the time available for the implementation and testing of the averaging algorithms, it was decided to use the square shape for planar evaluation surfaces only. On curved surfaces, the averaging area was constructed from the intersection of a sphere and the exposed surface. The square averaging-area shape was assumed to yield no advantage over the sphere-intersection shape with respect to the correlation between incident power density and induced tissue heating.

The development of an alternative algorithm that approximates a square shape for the construction of the averaging area on curved surfaces is intended for the maintenance phase of the standards. A suggestion for a specification is given in Annex G of IEC/IEEE 63195-2:2021.

Bibliography

- [1] IEC/IEEE 62209-3:2019, Measurement procedure for the assessment of specific absorption rate of human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices – Part 3: Vector measurement-based systems (Frequency range of 600 MHz to 6 GHz)
- [2] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)," *Health Physics*, vol. 118, no. 5, pp 483-524, 2020
- [3] IEEE Std C95.1:2019, *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz*
- [4] S. Pfeifer et al., "Total field reconstruction in the near field using pseudo-vector E-field measurements," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, no. 2, pp 476-486, Apr. 2019
- [5] ISO/IEC 17025:2017, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*
- [6] IEC TR 62630:2010, *Guidance for evaluating exposure from multiple electromagnetic sources*
- [7] EN 50360:2017, *Product standard to demonstrate the compliance of wireless communication devices, with the basic restrictions and exposure limit values related to human exposure to electromagnetic fields in the frequency range from 300 MHz to 6 GHz: devices used next to the ear*
- [8] EN 50566:2017, *Product standard to demonstrate the compliance of wireless communication devices with the basic restrictions and exposure limit values related to human exposure to electromagnetic fields in the frequency range from 30 MHz to 6 GHz: hand-held and body mounted devices in close proximity to the human body*
- [9] IEC 62311:2019, *Assessment of electronic and electrical equipment related to human exposure restrictions for electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)*
- [10] IEC TR 63170:2018, *Measurement procedure for the evaluation of power density related to human exposure to radio frequency fields from wireless communication devices operating between 6 GHz and 100 GHz*
- [11] Gordon, C. C., et al., 1988 Anthropometric Survey of U.S. Army Personnel: Methods and Summary Statistics, Technical Report NATICK/TR-89/044, U.S. Army Natick Research, Development and Engineering Center, Natick, Massachusetts, Sept. 1989
- [12] S. Reboux, S. Pfeifer, N. Kuster, "Maximum exposure assessment of millimeter-wave array antennas," *Proc. 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2020)*, Copenhagen, Denmark, 15-20 March 2020 (IEEE), pp. 2419-2422
- [13] M. Teniou, O. Jawad, S. Pannetrat, L. Aberbour, "A fast and rigorous assessment of the specific absorption rate (SAR) for MIMO cellular equipment based on vector near-field measurements," *Proc. 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2020)*, Copenhagen, Denmark, 15-20 March 2020 (IEEE), pp. 264-268
- [14] A. Newell, "Error Analysis Techniques for Planar Near-Field Measurements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 36, no. 6, pp 754-768, June 1988

- [15] ETR 028, Radio Equipment and Systems (RES); Uncertainties in the Measurement of Mobile Radio Equipment Characteristics, ETSI, 1994
- [16] B. Derat, "5G antenna characterization in the far-field: How close can far-field be?," 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC), Singapore, 2018, pp 959-962, doi: 10.1109/ISEMC.2018.8393926
- [17] E. Carrasco, D. Colombi, K. R. Foster, M. Ziskin, Q. Balzano, "Exposure Assessment of Portable Wireless Devices Above 6 GHz," *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 183, no. 4, pp 489-496, June 2019
- [18] ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*
- [19] ISO/IEC Guide 98-1:2009, *Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement*
- [20] IEEE Std 1720-2012, *IEEE recommended practice for near-field antenna measurements*
- [21] CTIA Test Plan for Wireless Device Over-the-Air Performance v.3.8.2
- [22] 3GPP TS 38.521-2, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone (Release 16)
- [23] IEEE Std 1309-2013, *IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes (Excluding Antennas) from 9 kHz to 40 GHz*
- [24] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, "A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures," *Optik* 35(2), 237-246, 1972
- [25] A. P. Anderson, and S. Sali, "New possibilities for phaseless microwave diagnostics. Part 1: Error reduction techniques," *IEE Proceedings*, vol 132, pt. H, no. 5, pp 291-298, Aug. 1985
- [26] O.M. Bucci, G. D'Elia, G. Leone and R. Pierri, "Far-field pattern determination from the near-field amplitude on two surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 38, no. 11, Nov. 1990
- [27] R. Pierri, G. D'Elia, F. Soldovieri, "A two probes scanning phaseless near-field far-field transformation technique," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 47, no. 5, May 1999
- [28] S. Pfeifer, N. Jain, S. Kuehn, E. Neufeld, K. Pokovic, J. Xi, A. Christ, N. Kuster, "mm-Wave Experimental Scanning System to Determine the Complete Field by Near-to-Near Field and Near-to-Far Field Transformation," In 2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC) 2019 Mar 9 (pp 1-2)
- [29] S. Pfeifer, J. Xi, S. Kuehn, B. Kochali, N. Kuster, "Near-to-near- and near-to-far-field transformation for millimeter-wave frequencies," European Conference on Antennas and Propagation, 15-20 March 2020
- [30] C. Cappellin, O. Breinbjerg, A. Frandsen, "Properties of the transformation from the spherical wave expansion to the plane wave expansion," *Radio Science*, vol. 43, no. 1, February 2008

- [31] C. A. Balanis, *Advanced engineering electromagnetics*. John Wiley & Sons, 1999
- [32] H. Hamam and J. de Bougrenet de la Tocnaye, "Binary logic based purely on Fresnel diffraction," *Applied Optics*, vol. 34, no. 26, 1995
- [33] J. J. H. Wang, "An examination of the theory and practices of planar near-field measurement," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 36, no. 6, June 1988
- [34] A. E. H. Love, "The integration of the equations of propagation of electric waves," *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, vol. 197, pp 1-45, 1901
- [35] J. L. A. Quijano and G. Vecchi, "Improved-accuracy source reconstruction on arbitrary 3-D surfaces," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp 1046–1049, 2009
- [36] J. Lundgren et al, "Near Field Reconstruction for Electromagnetic Exposure of 5G Communication", presented at AMTA 2018, 2018
- [37] L. Scialacqua et al, "Power Density Measurement at 5G Millimeter-Wave Using Inverse Source Method," AMTA 2018 Proceedings, 2018
- [38] K. Sasaki et al., "Error Analysis of a Near-Field Reconstruction Technique Based on Plane Wave Spectrum Expansion for Power Density Assessment above 6 GHz," IEEE Access, 2019
- [39] Y. Alvarez et al., "Reconstruction of equivalent currents distribution over arbitrary three-dimensional surfaces based on integral equation algorithms," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 12, pp 3460–3468, 2007
- [40] K. Persson and M. Gustafsson, "Reconstruction of equivalent currents using a near-field data transformation – with radome applications," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 54, 179-198, 2005
- [41] P. C. Hansen, "Discrete inverse problems: insight and algorithms". SIAM-Society for Industrial and Applied Mathematics, 2010
- [42] D. Colton and R. Kress, *Integral equation methods in scattering theory*, Wiley-Interscience Publication, New York., 1983
- [43] D. Colton, R. Kress, *Inverse acoustic and electromagnetic scattering theory*, Third Edition. Springer, 1998
- [44] B. Xu, M. Gustafsson, S. Shi, K. Zhao, Z. Ying and S. He, *RF EMF exposure compliance of mmWave array antennas for 5G user equipment application* (Technical Report LUTEDX/(TEAT-7248)/1-18/(2017), vol. 7248), 2017 [viewed 2021-04-21]. Available at: https://portal.research.lu.se/portal/files/24604794/TEAT_7248.pdf
- [45] A. C. M. Austin and M. J. Neve, "Efficient field reconstruction using compressive sensing," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 3, pp. 1624-1627, March 2018
- [46] F. Las-Heras and T. K. Sarkar, "A direct optimization approach for source reconstruction and NF-FF transformation using amplitude-only data," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 50, no. 4, pp. 500–510, 2002

- [47] J. Quijano and G. Vecchi, "Field and source equivalence in source reconstruction on 3D surfaces," *PIER*, vol. 103, 2010
- [48] V. A. Morozov, *Methods for solving incorrectly posed problems*, Springer-Verlag, 1984
- [49] ISO/IEC 17043:2010, *Conformity assessment – General requirements for proficiency testing*
- [50] Samsung Electronics Co. Ltd. FCC ID: A3LSMG986U (Galaxy S20 5G+ variant) Portable Handset mmW Near Field Power Density Report Part 1 <https://fccid.io/A3LSMG986U/RF-Exposure-Info/mmWave-Near-Field-Power-Density-Test-Report-Part-1-4602638.pdf>
- [51] Samsung Electronics Co. Ltd. FCC ID: A3LSMG986U (Galaxy S20 5G+ variant) Portable Handset Test Setup Photos <https://fccid.io/A3LSMG986U/Test-Setup-Photos/mmWave-Near-Field-RF-Exposure-Power-Density-Test-Setup-Photos-4602703>
- [52] Samsung Electronics Co. Ltd. FCC ID: A3LSMG986U (Galaxy S20 5G+ variant) Portable Handset mmW Near Field Power Density Report Part 3 <https://fccid.io/A3LSMG986U/RF-Exposure-Info/mmWave-Near-Field-Power-Density-Test-Report-Part-3-4602640.pdf>
- [53] K. Li, K. Sasaki, S. Watanabe, and H. Shirai, "Relationship between power density and surface temperature elevation for human skin exposure to electromagnetic waves with oblique incidence angle from 6 GHz to 1 THz," *Physics in Medicine & Biology*, 64:065016, 2019
- [54] T. Samaras, and N. Kuster, "Theoretical evaluation of the power transmitted to the body as a function of angle of incidence and polarization at frequencies > 6 GHz and its relevance for standardization," *Bioelectromagnetics*, 40:136–139, 2019
- [55] A. Christ, T. Samaras, E. Neufeld, and N. Kuster, "Transmission coefficient of power density into skin tissue between 6 – 300 GHz," *Radiation Protection Dosimetry*, 192(1):113-118, 2020
- [56] A. Christ, T. Samaras, E. Neufeld, and N. Kuster, "Limitations of Incident Power Density as a Proxy for Induced Electromagnetic Fields," *Bioelectromagnetics*, 41(5), 348-359, 2020
- [57] IEEE P2889:2021, *IEEE Draft Guide for the Definition of Incident Power Density to Correlate Surface Temperature Elevation*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	152
INTRODUCTION.....	154
1 Domaine d'application	155
2 Références normatives	156
3 Termes et définitions	156
3.1 Paramètres et indicateurs d'exposition	156
3.2 Paramètres spatiaux, physiques et géométriques associés aux indicateurs d'exposition	159
3.3 Instrumentation de mesure, sonde de champ et paramètres de traitement des données	161
3.4 Paramètres de puissance RF	164
3.5 Paramètres techniques de fonctionnement et d'antenne du dispositif d'essai	165
3.6 Configurations physiques des dispositifs d'essai	166
3.7 Paramètres d'incertitude	168
4 Symboles et termes abrégés	169
4.1 Symboles	169
4.1.1 Grandeurs physiques	169
4.1.2 Constantes	170
4.2 Termes abrégés	170
5 Guide de démarrage rapide et application du présent document	171
5.1 Guide de démarrage rapide	171
5.2 Application du présent document	174
5.3 Conditions	174
6 Exigences relatives au système de mesure et au laboratoire	174
6.1 Exigences générales	174
6.2 Exigences relatives au laboratoire	176
6.3 Exigences relatives à la sonde de champ	176
6.4 Exigences relatives à l'instrumentation de mesure	177
6.5 Exigences relatives au système de balayage	177
6.5.1 Systèmes à sonde unique	177
6.5.2 Systèmes à sonde de champ multiple	178
6.6 Exigences relatives au support de dispositif	178
6.7 Grandeurs, procédures et exigences relatives au post-traitement	179
6.7.1 Formules de calcul de la sPD	179
6.7.2 Procédure de post-traitement	181
6.7.3 Exigences	182
7 Protocole d'évaluation de la densité de puissance	183
7.1 Généralités	183
7.2 Préparation du mesurage	183
7.2.1 Vérification relative du système	183
7.2.2 Exigences relatives au DUT	183
7.2.3 Préparation du DUT	184
7.2.4 Choix des surfaces d'évaluation	185
7.3 Essais à réaliser	189
7.3.1 Généralités	189
7.3.2 Essais à réaliser en cas de prise en charge par simulations du réseau d'antenne	191

7.3.3	Essais à réaliser par des mesures du réseau d'antenne.....	193
7.4	Procédure de mesure.....	193
7.4.1	Procédure de mesure générale.....	193
7.4.2	Méthodes d'évaluation de la densité de puissance.....	195
7.4.3	Mise à l'échelle de la puissance selon le mode de fonctionnement et le canal	197
7.4.4	Correction de la dérive du DUT.....	199
7.5	Combinaison d'expositions.....	200
7.5.1	Généralités.....	200
7.5.2	Combinaison des résultats de la densité de puissance et du DAS.....	202
8	Estimation de l'incertitude.....	204
8.1	Généralités	204
8.2	Exigences relatives aux évaluations de l'incertitude	205
8.3	Description des modèles d'incertitude	205
8.4	Termes d'incertitude dépendant du système de mesure	206
8.4.1	<i>CAL</i> – Etalonnage de l'équipement de mesure (CALibration).....	206
8.4.2	<i>COR</i> – Correction de la sonde.....	206
8.4.3	<i>FRS</i> – Réponse en fréquence (Frequency ReSponse)	206
8.4.4	<i>SCC</i> – Couplage croisé de capteurs (Sensor Cross Coupling)	207
8.4.5	<i>ISO</i> – Isotropie	208
8.4.6	<i>LIN</i> – Erreur de linéarité du système.....	208
8.4.7	<i>PSC</i> – Diffusion de la sonde (Probe SCattering)	209
8.4.8	<i>PPO</i> – Décalage de positionnement de la sonde (Probe Positioning Offset)	209
8.4.9	<i>PPR</i> – Répétabilité du positionnement de la sonde (Probe Positioning Repeatability)	210
8.4.10	<i>SMO</i> – Décalage mécanique du capteur (Sensor Mechanical Offset).....	211
8.4.11	<i>PSR</i> – Résolution spatiale de la sonde (Probe Spatial Resolution)	211
8.4.12	<i>FLD</i> – Influence de l'impédance de champ (FieLD impedance dependence) (rapport $ E / H $).....	211
8.4.13	<i>MED</i> – Dérive de mesure (MEasurement Drift).....	211
8.4.14	<i>APN</i> – Bruit d'amplitude et de phase (Amplitude and Phase Noise)	212
8.4.15	<i>TR</i> – Troncature de la zone de mesure	212
8.4.16	<i>DAQ</i> – Acquisition de données (Data AcQuisition)	212
8.4.17	<i>SMP</i> – Echantillonnage (SaMPling)	212
8.4.18	<i>REC</i> – Reconstruction de champ	212
8.4.19	<i>SNR</i> – Rapport signal sur bruit (Signal to Noise Ratio)	213
8.4.20	<i>TRA</i> – Transformation directe et transformation inverse	213
8.4.21	<i>SCA</i> – Mise à l'échelle de la densité de puissance (SCaling).....	214
8.4.22	<i>SAV</i> – Moyennage spatial (Spatial AVeraging)	214
8.4.23	<i>COM</i> – Combinaison d'expositions	214
8.5	Termes d'incertitude dépendant du DUT et des facteurs environnementaux.....	214
8.5.1	<i>PC</i> – Couplage de la sonde avec le DUT (Probe Coupling)	214
8.5.2	<i>MOD</i> – Réponse en modulation	215
8.5.3	<i>IT</i> – Temps d'intégration (Integration Time)	216
8.5.4	<i>RT</i> – Temps de réponse (Response Time)	216
8.5.5	<i>DH</i> – Influence du support de dispositif (Device Holder influence)	216
8.5.6	<i>DA</i> – Alignement du DUT (DUT Alignment)	216
8.5.7	<i>AC</i> – Conditions radiofréquences ambiantes (RF Ambient Conditions).....	217
8.5.8	<i>TEM</i> – Température du laboratoire	217

8.5.9	<i>REF</i> - Réflexions dans le laboratoire	217
8.5.10	<i>MSI</i> – Immunité du système de mesure/réception secondaire (Measurement System Immunity).....	217
8.5.11	<i>DRI</i> – Dérive du DUT (<i>DRift</i>).....	217
8.6	Incertitude composée et élargie	218
9	Rapport de mesure	221
9.1	Généralités	221
9.2	Éléments à enregistrer dans les rapports de mesure.....	221
Annexe A (normative) Vérification du système de mesure et essais de validation du système		225
A.1	Vue d'ensemble	225
A.2	Normalisation en fonction de la puissance totale rayonnée	226
A.2.1	Généralités	226
A.2.2	Option 1: Mesure de la puissance acceptée.....	226
A.2.3	Option 2: Mesure de la puissance totale rayonnée.....	231
A.3	Vérification relative du système	231
A.3.1	Objet	231
A.3.2	Antenne et conditions d'essai	232
A.3.3	Procédure.....	232
A.3.4	Critères d'acceptation	232
A.4	Vérification absolue du système.....	234
A.4.1	Objet	234
A.4.2	Antenne et conditions d'essai	234
A.4.3	Procédure.....	234
A.4.4	Critères d'acceptation	235
A.5	Validation du système	235
A.5.1	Objet	235
A.5.2	Procédure.....	236
A.5.3	Validation de la réponse en modulation	236
A.5.4	Critères d'acceptation	237
Annexe B (normative) Antennes pour la vérification du système et les essais de validation du système		239
B.1	Généralités	239
B.2	Antennes cornets pyramidales pour les vérifications du système	240
B.3	Réseaux de dipôles alimentés par cavité pour la validation du système	241
B.3.1	Description	241
B.3.2	Valeurs numériques cibles pour les réseaux de dipôles alimentés par cavité	244
B.3.3	Modèles de distribution du champ et de la densité de puissance	244
B.3.4	Diagrammes de rayonnement en champ lointain	249
B.4	Cornets pyramidaux à réseaux de fentes rayonnantes pour la validation du système	251
B.4.1	Description	251
B.4.2	Valeurs numériques cibles pour les cornets pyramidaux chargés d'un réseau de fentes rayonnantes.....	253
B.4.3	Modèles de distribution du champ et de la densité de puissance	254
B.4.4	Diagrammes de rayonnement en champ lointain	259
B.5	Procédure de validation de l'antenne	260
B.5.1	Généralités	260
B.5.2	Objectifs, domaine d'application et spécifications d'usage	261

B.5.3	Conception de l'antenne	261
B.5.4	Cibles numériques	261
B.5.5	Etalonnage des antennes de référence	261
B.5.6	Vérification des antennes et espérance de vie	261
B.5.7	Considérations relatives au bilan d'incertitudes	262
B.6	Procédure de validation pour les signaux à large bande	262
B.6.1	Généralités	262
B.6.2	Signaux de validation	262
B.6.3	Antennes et configuration de validation	262
B.6.4	Valeurs cibles des antennes de validation émettant des signaux à large bande	262
B.6.5	Incertitude relative au signal à large bande	263
B.6.6	Procédure de validation	263
Annexe C (normative)	Etalonnage et caractérisation des sondes de mesure	264
C.1	Généralités	264
C.2	Etalonnage des sondes à guide d'ondes	264
C.2.1	Généralités	264
C.2.2	Sensibilité	264
C.2.3	Linéarité	265
C.2.4	Limite de détection inférieure	265
C.2.5	Isotropie	265
C.2.6	Temps de réponse	265
C.3	Etalonnage des sondes scalaires isotropes de champ E ou de champ H	265
C.3.1	Généralités	265
C.3.2	Sensibilité	265
C.3.3	Isotropie	266
C.3.4	Linéarité	266
C.3.5	Limite de détection inférieure	266
C.3.6	Temps de réponse	266
C.4	Etalonnage des sondes de phaseur de champ E ou de champ H	266
C.4.1	Généralités	266
C.4.2	Sensibilité	267
C.4.3	Isotropie	267
C.4.4	Linéarité	267
C.4.5	Limite de détection inférieure	267
C.5	Paramètres relatifs à l'incertitude de l'étalonnage	268
C.5.1	Généralités	268
C.5.2	Puissance d'entrée de l'antenne	268
C.5.3	Effet de désadaptation (mesure de la puissance d'entrée)	268
C.5.4	Gain et distance de décalage	268
C.5.5	Spectre du signal	269
C.5.6	Stabilité de la configuration	269
C.5.7	Incertitude relative aux variations d'impédance de champ	269
C.6	Modèle de bilan d'incertitudes	270
Annexe D (informative)	Informations sur l'utilisation d'une forme carrée ou d'une forme circulaire pour la zone de moyennage de la densité de puissance dans le cadre des évaluations de conformité	272
D.1	Généralités	272
D.2	Méthode utilisant l'analyse computationnelle	272

D.3	Zones de moyennage de forme carrée et de forme circulaire sur une surface d'évaluation plane	273
D.4	Zones de moyennage de forme carrée et de forme circulaire sur une surface d'évaluation non plane	275
Annexe E (informative) Algorithmes de reconstruction		277
E.1	Généralités	277
E.2	Méthodes d'extraction des composantes de champ et des densités de puissance locales	277
E.2.1	Généralités	277
E.2.2	Approches sans la phase	278
E.2.3	Approches utilisant les mesures des ellipses de polarisation du champ E	278
E.2.4	Mesures directes en champ proche	278
E.3	Transformation (propagation) directe des champs	279
E.3.1	Généralités	279
E.3.2	Méthodes d'expansion de champ	280
E.3.3	Méthodes utilisant des équations intégrales de champ	280
E.4	Transformation (propagation) inverse des champs	281
E.4.1	Généralités	281
E.4.2	Méthodes d'expansion de champ – expansion en onde plane	282
E.4.3	Méthodes de source inverse	282
E.5	Fonctions analytiques de référence	283
Annexe F (informative) Comparaisons interlaboratoires		286
F.1	Objet	286
F.2	Dispositifs de référence	286
F.3	Configuration d'alimentation	286
F.4	Comparaisons interlaboratoires – procédure	286
Annexe G (informative) Exemple d'essai et de vérification de la densité de puissance		287
G.1	Objet	287
G.2	Présentation du DUT	287
G.3	Vérification du système d'essai	287
G.4	Montage d'essai	287
G.5	Résultats de densité de puissance	287
G.6	Exposition combinée (rapport d'exposition totale)	287
Annexe H (informative) Applicabilité des approximations d'onde plane équivalente		288
H.1	Objectif	288
H.2	Méthode	288
H.3	Résultats	289
H.4	Discussion	290
Annexe I (informative) Justifications des concepts et méthodes appliqués dans le présent document et l'IEC/IEEE 63195-2		291
I.1	Plage de fréquences	291
I.2	Calcul de la sPD	291
I.2.1	Application du vecteur de Poynting pour le calcul de la densité de puissance incidente	291
I.2.2	Zone de moyennage	292
Bibliographie		293
Figure 1 – Guide de démarrage rapide		173

Figure 2 – Représentation simplifiée d'un montage de mesure générique impliquant l'utilisation d'algorithmes de reconstruction	182
Figure 3 – Vue transversale du fantôme SAM pour les évaluations du DAS au niveau du plan de référence, comme cela est décrit dans l'IEC/IEEE 62209-1528:2020	187
Figure 4 – Vue transversale du fantôme SAM virtuel pour les évaluations de la densité de puissance au niveau du plan de référence (l'épaisseur de l'enveloppe est de 2 mm en tout point, y compris au niveau du pavillon).....	187
Figure 5 – Exemple de système de coordonnées de référence pour l'ERP gauche du fantôme SAM	189
Figure 6 – Exemple de points de référence et de lignes verticales et horizontales sur un DUT	189
Figure 7 – Logigramme de la procédure d'essai donnée en 7.3	191
Figure 8 – Logigramme de la procédure de mesure générale donnée en 7.4.1	194
Figure 9 – Logigramme des méthodes d'évaluation de la densité de puissance données en 7.4.2	196
Figure 10 – Evaluation du DAS et de la densité de puissance en un point	203
Figure 11 – Combinaison du DAS (en haut) et de la densité de puissance (en bas) pour le fantôme SAM	204
Figure A.1 – Montage de mesure de la puissance acceptée recommandé pour la vérification relative du système, la vérification absolue du système et la validation du système	227
Figure A.2 – Configuration de l'équipement pour la mesure de la puissance incidente P_f et de la puissance couplée incidente P_{fc}	227
Figure A.3 – Configuration de l'équipement pour la mesure de la puissance couplée inverse en court-circuit P_{rcs}	228
Figure A.4 – Configuration de l'équipement pour la mesure de la puissance avec l'antenne de référence	228
Figure A.5 – Numérotation des accès pour les mesures du paramètre S du coupleur directif	230
Figure B.1 – Dimensions principales des réseaux de dipôles alimentés par cavité – Modèle à 30 GHz	242
Figure B.2 – Modèles 10 GHz de $ E_{total} $ et $Re\{S\}_{total}$ pour les réseaux de dipôles alimentés par cavité aux distances de a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, et d) 50 mm de la surface supérieure du substrat diélectrique.....	245
Figure B.3 – Modèles 30 GHz de $ E_{total} $ et $Re\{S\}_{total}$ pour les réseaux de dipôles alimentés par cavité aux distances de a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, et d) 50 mm de la surface supérieure du substrat diélectrique.....	246
Figure B.4 – Modèles 60 GHz de $ E_{total} $ et $Re\{S\}_{total}$ pour les réseaux de dipôles alimentés par cavité aux distances de a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, et d) 50 mm de la surface supérieure du substrat diélectrique.....	247
Figure B.5 – Modèles 90 GHz de $ E_{total} $ et $Re\{S\}_{total}$ pour les réseaux de dipôles alimentés par cavité aux distances de a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, et d) 50 mm de la surface supérieure du substrat diélectrique.....	248
Figure B.6 – Diagrammes de rayonnement en champ lointain de réseaux de dipôles alimentés par cavité à a) 10 GHz, b) 30 GHz, c) 60 GHz et d) 90 GHz	250
Figure B.7 – Dimensions principales du gabarit en acier inoxydable de 0,15 mm avec réseau de fentes rayonnantes.....	251
Figure B.8 – Dimensions principales des antennes cornets pyramidales	252

Figure B.9 – Modèles 10 GHz de $ E_{\text{total}} $ et $\text{Re}\{S\}_{\text{total}}$ pour le cornet pyramidal chargé d'un réseau de fentes rayonnantes aux distances de a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, et d) 50 mm de la surface supérieure du réseau de fentes rayonnantes	255
Figure B.10 – Modèles 30 GHz de $ E_{\text{total}} $ et $\text{Re}\{S\}_{\text{total}}$ pour le cornet pyramidal chargé d'un réseau de fentes rayonnantes aux distances de a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, et d) 50 mm de la surface supérieure du réseau de fentes rayonnantes	256
Figure B.11 – Modèles 60 GHz de $ E_{\text{total}} $ et $\text{Re}\{S\}_{\text{total}}$ pour le cornet pyramidal chargé d'un réseau de fentes rayonnantes aux distances de a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, et d) 50 mm de la surface supérieure du réseau de fentes rayonnantes	257
Figure B.12 – Modèles 90 GHz de $ E_{\text{total}} $ et $\text{Re}\{S\}_{\text{total}}$ pour le cornet pyramidal chargé d'un réseau de fentes rayonnantes aux distances de a) 2 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, et d) 50 mm de la surface supérieure du réseau de fentes rayonnantes	258
Figure B.13 – Diagrammes de rayonnement en champ lointain d'un cornet pyramidal à a) 10 GHz, b) 30 GHz, c) 60 GHz et d) 90 GHz chargé d'un réseau de fentes rayonnantes	260
Figure D.1 – Vue schématique de l'évaluation de la variation de la sPD avec une forme carrée en faisant pivoter l'antenne en essai	272
Figure D.2 – Comparaison de la $psPD$ moyennée à l'aide de zones de forme carrée par rapport à celle moyennée à l'aide de zones de forme circulaire sur des surfaces d'évaluation planes	274
Figure D.3 – Exemples de distributions de la PD dans une surface d'évaluation où le dispositif est tenu près de l'oreille	275
Figure D.4 – Comparaison de la $psPD$ moyennée en utilisant une zone en forme de section transversale de cube (carrée) par rapport à une zone en forme de section transversale de sphère (circulaire) comme surface d'évaluation où le dispositif est tenu près de l'oreille	276
Figure E.1 – Simulation (à gauche) et transformation directe à partir de mesures en appliquant les méthodes décrites dans [29] (à droite) de la densité de puissance dans le plan xz (en haut) et le plan yz (en bas) à une distance de 2 mm pour un réseau de dipôles alimenté par cavité à 30 GHz (voir Annexe B)	279
Figure H.1 – $psPD_{\text{pwe}} / psPD_{\text{tot}}$ comme fonction de la distance (en unités de λ) entre le réseau de dipôles alimenté par cavité (CDA##G, côté gauche) et le cornet pyramidal avec réseaux de fentes rayonnantes (SH##G, côté droit) fonctionnant à 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz et 90 GHz	290
Tableau 1 – Liste de vérification du plan d'évaluation	172
Tableau 2 – Distance d'évaluation minimale entre l'antenne du DUT et la surface d'évaluation pour laquelle l'approximation de l'onde plane équivalente s'applique	196
Tableau 3 – Modèle d'incertitude de mesure pour les mesures de la densité de puissance	219
Tableau 4 – Exemple de bilan d'incertitudes de mesure pour les résultats de mesure de la densité de puissance	220
Tableau A.1 – Exemple d'incertitude de mesure de la puissance	230
Tableau A.2 – Signaux de communication pour l'essai de réponse en modulation	237
Tableau B.1 – Valeurs cibles pour les antennes cornets pyramidales à différentes fréquences	240
Tableau B.2 – Dimensions principales des réseaux de dipôles alimentés par cavité pour chaque fréquence d'intérêt	241
Tableau B.3 – Paramètres géométriques des réseaux de dipôles alimentés par cavité pour chaque fréquence d'intérêt	243

Tableau B.4 – Paramètres du substrat et du bloc métallique des réseaux de dipôles alimentés par cavité pour chaque fréquence d'intérêt.....	243
Tableau B.5 – Valeurs cibles pour les réseaux de dipôles alimentés par cavité à 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz et 90 GHz	244
Tableau B.6 – Dimensions principales du gabarit avec réseau de fentes rayonnantes pour chaque fréquence	252
Tableau B.7 – Dimensions primaires des cornets pyramidaux correspondants pour chaque fréquence	253
Tableau B.8 – Valeurs cibles pour les cornets pyramidaux chargés de réseaux de fentes rayonnantes à 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz et 90 GHz.....	254
Tableau C.1 – Analyse de l'incertitude de l'étalonnage de la sonde	270
Tableau D.1 – Valeurs de modulation de phase pour l'antenne en réseau.....	275
Tableau E.1 – Liste des fonctions analytiques de référence et des valeurs cibles de $psPD_{n+}$ associées.....	284
Tableau E.2 – Liste des fonctions analytiques de référence et des valeurs cibles de $psPD_{tot+}$ associées.....	284
Tableau E.3 – Liste des fonctions analytiques de référence et des valeurs cibles de $psPD_{mod+}$ associées	285

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ÉVALUATION DE LA DENSITÉ DE PUISSANCE DE L'EXPOSITION HUMAINE AUX CHAMPS RADIOFRÉQUENCES PROVENANT DE DISPOSITIFS SANS FIL À PROXIMITÉ IMMÉDIATE DE LA TÊTE ET DU CORPS (PLAGE DE FRÉQUENCES DE 6 GHz À 300 GHz) –**Partie 1: Procédure de mesure****AVANT-PROPOS**

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux.

Les normes de l'IEEE sont élaborées par les Sociétés de l'IEEE, ainsi que par les Comités de coordination des normes du Conseil de normalisation de l'IEEE Standards Association (IEEE-SA). Ces normes sont l'aboutissement d'un consensus, approuvé par l'American National Standards Institute, qui rassemble des bénévoles représentant divers points de vue et intérêts. Les participants bénévoles ne sont pas nécessairement membres de l'IEEE et leur intervention n'est pas rétribuée. Si l'IEEE administre le déroulement de cette procédure et définit les règles destinées à favoriser l'équité du consensus, l'IEEE lui-même n'évalue pas, ne teste pas et ne vérifie pas l'exactitude de toute information contenue dans ses normes. L'utilisation de normes de l'IEEE est entièrement volontaire. *Les documents de l'IEEE sont disponibles à des fins d'utilisation, à condition d'être assortis d'avis importants et de clauses de non-responsabilité (voir <http://standards.ieee.org/ipr/disclaimers.html> pour de plus amples informations).*

L'IEC travaille en étroite collaboration avec l'IEEE, selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations. La présente Norme internationale double logo a été développée conjointement par l'IEC et l'IEEE dans le cadre de cet accord.

- 2) Les décisions officielles de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études. Une fois le consensus établi entre les Sociétés de l'IEEE et les Comités de coordination des normes, les décisions officielles de l'IEEE relatives aux questions techniques sont déterminées en fonction du vote exprimé par un groupe à la composition équilibrée, composé de parties intéressées qui manifestent leur intérêt pour la révision des normes proposées. L'approbation finale de la norme de l'IEEE est soumise au Conseil de normalisation de l'IEEE Standards Association (IEEE SA).
- 3) Les Publications IEC/IEEE se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC/Sociétés de l'IEEE. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin de s'assurer de l'exactitude du contenu technique des Publications IEC/IEEE; l'IEC ou l'IEEE ne peuvent pas être tenus responsables de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC (y compris les Publications IEC/IEEE) dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications IEC/IEEE et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC et l'IEEE eux-mêmes ne fournissent aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC et l'IEEE ne sont responsables d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC ou à l'IEEE, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, ou les bénévoles des Sociétés de l'IEEE et des Comités de coordination des normes du Conseil de normalisation de l'IEEE Standards Association (IEEE-SA), pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication IEC/IEEE ou toute autre publication de l'IEC ou de l'IEEE, ou au crédit qui lui est accordé.

- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur fait que la mise en application de cette Publication IEC/IEEE peut requérir l'utilisation de matériels protégés par des droits de brevet. En publiant cette norme, aucun parti n'est pris concernant l'existence ou la validité de droits de brevet y afférents. Ni l'IEC ni l'IEEE ne peuvent être tenus d'identifier les revendications de brevet essentielles pour lesquelles une autorisation peut s'avérer nécessaire, d'effectuer des recherches sur la validité juridique ou l'étendue des revendications des brevets, ou de déterminer le caractère raisonnable ou non discriminatoire des termes ou conditions d'autorisation énoncés dans le cadre d'un Certificat d'assurance, lorsque la demande d'un tel certificat a été formulée, ou contenus dans tout accord d'autorisation. Les utilisateurs de cette norme sont expressément informés du fait que la détermination de la validité de tous droits de propriété industrielle, ainsi que les risques qu'implique la violation de ces droits, relèvent entièrement de leur seule responsabilité.

L'IEC/IEEE 63195-1 a été établie par le comité d'études 106 de l'IEC: Méthodes d'évaluation des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques en relation avec l'exposition humaine, en coopération avec l'International Committee on Electromagnetic Safety (ICES) de l'IEEE Standards Association, sous accord double logo IEC/IEEE entre l'IEC et l'IEEE. Il s'agit d'une Norme internationale.

Le présent document est publié en tant que norme double logo IEC/IEEE.

La présente publication contient des fichiers complémentaires sous la forme de fonctions analytiques de référence pour la validation des algorithmes de reconstruction décrits à l'Annexe E. Les liens de téléchargement de ces fichiers peuvent être consultés à l'Article E.5.

Le texte de la présente Norme internationale est issu des documents de l'IEC suivants:

Projet	Rapport de vote
106/565/FDIS	106/570/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à son approbation.

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Le présent document a été rédigé conformément aux règles données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2, disponibles à l'adresse www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/standardsdev/publications.

Une liste de toutes les parties de la série IEC/IEEE 63195, publiées sous le titre général *Evaluation de la densité de puissance de l'exposition humaine aux champs radioélectriques provenant de dispositifs sans fil à proximité immédiate de la tête et du corps*, se trouve sur le site web de l'IEC.

Le comité d'études de l'IEC et le comité technique de l'IEEE ont décidé que le contenu du présent document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. A cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de ce document indique qu'il contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

Le présent document fournit des méthodes pour évaluer les expositions à une densité de puissance incidente dues à des dispositifs de transmission par champ électromagnétique (EMF, *Electromagnetic Field*) conçus pour être utilisés à proximité de la tête ou du corps humain, ou pour être installés sur le corps, combinés avec d'autres émetteurs dans un même produit ou être intégrés dans des vêtements. Les catégories de dispositifs couvertes incluent notamment les téléphones mobiles, les émetteurs radio des ordinateurs personnels, les dispositifs de bureau et les dispositifs portables. Le présent document traite également des dispositifs multibandes et multiantennes. La plage de fréquences globale applicable est comprise entre 6 GHz et 300 GHz. Le présent document spécifie:

- le système de mesure (Article 6);
- les protocoles de mesure de la densité de puissance (Article 7);
- l'évaluation de l'incertitude (Article 8);
- le rapport de mesure (Article 9);
- les vérifications et la validation du système (Annexe B).

En vue d'établir le présent document, le comité d'études 106 (CE 106) de l'IEC et le sous-comité 1 (SC 1) du comité technique 34 (TC 34) de l'International Committee on Electromagnetic Safety (ICES) de l'IEEE ont formé le groupe de travail mixte 12 (JWG 12) concernant les méthodes de mesure pour l'évaluation de la densité de puissance des champs électromagnétiques en provenance de dispositifs sans fil à proximité immédiate de la tête et du corps.

Le présent document est en partie issu du document IEC TR 63170:2018.

NOTE Les essais de validation du système sont indiqués à l'Annexe B pour les fréquences de 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz et 90 GHz afin de couvrir la plage de fréquences de 6 GHz à 110 GHz. Des antennes de validation supplémentaires qui permettent de couvrir la plage de fréquences jusqu'à 300 GHz seront élaborées dans une révision ultérieure du présent document. Une analyse plus approfondie des justifications est donnée à l'Annexe I.

ÉVALUATION DE LA DENSITÉ DE PUISSANCE DE L'EXPOSITION HUMAINE AUX CHAMPS RADIOFRÉQUENCES PROVENANT DE DISPOSITIFS SANS FIL À PROXIMITÉ IMMÉDIATE DE LA TÊTE ET DU CORPS (PLAGE DE FRÉQUENCES DE 6 GHz À 300 GHz) –

Partie 1: Procédure de mesure

1 Domaine d'application

Le présent document spécifie les protocoles et les procédures d'essai relatifs aux mesures répétables et reproductibles de la densité de puissance (PD, *Power Density*) qui donnent des estimations prudentes de l'exposition de la tête ou du corps humain aux champs provenant de dispositifs de communication qui émettent un champ électromagnétique (EMF, *Electromagnetic Field*) radiofréquence (RF), avec une incertitude de mesure spécifiée. Ces protocoles et procédures s'appliquent aux évaluations de l'exposition d'une vaste majorité de la population lors de l'utilisation de dispositifs de communication qui émettent des RF tenus à la main et portés sur le corps. Les méthodes s'appliquent aux dispositifs qui peuvent comporter un ou plusieurs émetteurs ou antennes, et qui peuvent être utilisés alors que leurs structures rayonnantes se trouvent à des distances inférieures ou égales à 200 mm de la tête ou du corps humain.

Les méthodes décrites dans le présent document peuvent être utilisées pour déterminer la conformité aux exigences en matière de densité de puissance maximale applicables de différents types de dispositifs qui émettent des RF lorsqu'ils sont utilisés à proximité immédiate de la tête et du corps, y compris s'ils sont combinés à d'autres dispositifs ou accessoires qui émettent des RF ou non (clip de ceinture, par exemple) ou s'ils sont intégrés dans des vêtements. La plage de fréquences globale applicable pour ces protocoles et procédures est comprise entre 6 GHz et 300 GHz.

Les catégories de dispositifs de communication qui émettent des RF couvertes par le présent document incluent notamment les téléphones mobiles, les émetteurs radio des ordinateurs personnels, les dispositifs de bureau et les dispositifs portables, ainsi que les dispositifs multibandes et multiantennes.

NOTE 1 Les essais de validation du système sont indiqués à l'Annexe B pour les fréquences de 10 GHz, 30 GHz, 60 GHz et 90 GHz afin de couvrir la plage de fréquences de 6 GHz à 110 GHz. Des antennes de validation supplémentaires qui permettent de couvrir la plage de fréquences jusqu'à 300 GHz seront élaborées dans une révision ultérieure du présent document. Une analyse plus approfondie des justifications est donnée à l'Annexe I.

NOTE 2 Les procédures d'essai et les protocoles décrits dans le présent document peuvent par ailleurs être adaptés afin d'évaluer l'exposition liée à des dispositifs autres que des dispositifs de communication utilisés à proximité de la tête ou du corps, ces dispositifs n'étant cependant pas couverts par le domaine d'application du présent document.

NOTE 3 Pour l'évaluation de l'exposition combinée en provenance de plusieurs émetteurs qui fonctionnent à des fréquences inférieures à 6 GHz, les normes applicables pour les mesures du débit d'absorption spécifique (DAS) sont l'IEC/IEEE 62209-1528:2020 et l'IEC/IEEE 62209-3:2019 [1].

NOTE 4 Pour la plage de fréquences entre 6 GHz et 10 GHz, le domaine d'application du présent document coïncide avec celui de l'IEC/IEEE 62209-1528:2020. Selon les lignes directrices de l'ICNIRP [2] et la norme C95.1 de l'ICES de l'IEEE [3], la densité de puissance est la mesure réglementaire dans cette plage de fréquences. Le DAS peut être utilisé comme mesure réglementaire si les exigences réglementaires locales le permettent (lorsqu'une seule bande de transmission comprend des canaux d'essai à des fréquences inférieures et supérieures à 6 GHz, par exemple).

Les procédures du présent document ne s'appliquent pas aux mesures du champ électromagnétique de dispositifs ou d'objets destinés à être implantés dans le corps.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC/IEEE 62209-1528:2020, *Measurement procedure for the assessment of specific absorption rate of human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices – Part 1528: Human models, instrumentation, and procedures (Frequency range of 4 MHz to 10 GHz)* (disponible en anglais seulement)

IEC/IEEE 63195-2:2021¹, *Evaluation de la densité de puissance de l'exposition humaine aux champs radiofréquences provenant de dispositifs sans fil à proximité immédiate de la tête et du corps (plage de fréquences de 6 GHz à 300 GHz) – Partie 2: Procédure de calcul*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

L'ISO, l'IEC et l'IEEE tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>
- IEEE Dictionary Online: disponible à l'adresse <http://dictionary.ieee.org>

3.1 Paramètres et indicateurs d'exposition

3.1.1

densité de puissance

PD

densité de puissance locale

fonction du vecteur de Poynting complexe S à l'emplacement r qui est intégrée sur une surface afin de calculer la sPD

Note 1 à l'article: Les spécifications de densité de puissance en ce qui concerne les intégrantes de la Formule (4), de la Formule (5) et de la Formule (8) sont fournies en 6.7.1. Voir également les justifications données à l'Annexe I concernant les spécifications de PD fournies en 6.7.1.

Note 2 à l'article: La formule utilisée pour calculer la PD peut dépendre des lignes directrices applicables en matière d'exposition ou des réglementations nationales.

Note 3 à l'article: La densité de puissance est également appelée "puissance surfacique".

Note 4 à l'article: Le terme associé "densité de puissance incidente" désigne la quantité de puissance par unité de surface qui a une incidence sur la surface du corps. La densité de puissance incidente sur la surface externe du corps est utilisée pour établir les niveaux de référence d'exposition locale qui s'appliquent à des fréquences supérieures à 6 GHz dans certaines juridictions.

Note 5 à l'article: L'abréviation "PD" est dérivée du terme anglais développé correspondant "power density".

¹ A paraître.

3.1.2**densité de puissance moyennée dans l'espace***sPD*densité de puissance (3.1.1) moyennée sur une surface d'aire A_{av}

Note 1 à l'article: La *sPD* est une fonction du vecteur de position r . Elle est définie sur la surface d'évaluation, en excluant les bords où aucune zone de moyennage ne peut être construite.

Note 2 à l'article: Par exemple, les tailles de zone de moyennage spécifiées dans les limites d'exposition sont de 1 cm² et/ou de 4 cm².

Note 3 à l'article: L'abréviation "sPD" est dérivée du terme anglais développé correspondant "spatial-average power density".

3.1.3**densité de puissance maximale moyennée dans l'espace***psPD*valeur maximale globale de toutes les valeurs de *sPD* (3.1.2) sur la surface d'évaluation (3.2.3)

Note 1 à l'article: La *psPD* est donnée par la Formule (1)

$$psPD = \max_r \{sPD(r)\} \quad (1)$$

où r est un point sur la surface d'évaluation.

Note 2 à l'article: D'autres valeurs maximales locales (c'est-à-dire des valeurs de densité de puissance maximale secondaire moyennée dans l'espace) peuvent exister (voir 3.1.4).

Note 3 à l'article: L'abréviation "psPD" est dérivée du terme anglais développé correspondant "peak spatial-average power density".

3.1.4**densité de puissance maximale secondaire moyennée dans l'espace**autres valeurs maximales locales de la densité de puissance moyennée dans l'espace (*sPD*) qui sont inférieures à la densité de puissance maximale moyennée dans l'espace (*psPD*)**3.1.5****vecteur de Poynting***S*produit vectoriel du champ électrique E et du champ magnétique H du champ électromagnétique en un point donné

Note 1 à l'article: Le flux du vecteur de Poynting à travers une surface fermée est égal à la puissance électromagnétique qui traverse cette surface.

Note 2 à l'article: Pour un champ électromagnétique périodique, la moyenne temporelle du vecteur de Poynting est un vecteur dont la direction, sous certaines réserves, peut être considérée comme étant la direction de propagation de l'énergie électromagnétique et la norme comme la puissance surfacique moyenne.

Note 3 à l'article: Pour une onde sinusoïdale de fréquence angulaire ω , le vecteur de Poynting complexe est exprimé par la Formule (2).

$$S = \frac{1}{2} E \times H^* \quad (2)$$

où E et H sont des phaseurs et l'astérisque indique le vecteur conjugué complexe.

Note 4 à l'article: L'unité du vecteur de Poynting est le watt par mètre carré (W/m²).

[SOURCE: IEC 60050-121:2019, 121-11-66 et IEC 60050-705:1995, 705-02-10, modifiés – Les entrées ont été combinées et réorganisées; la Note 4 a été ajoutée.]

3.1.6

approximation de l'onde plane équivalente

estimation de la densité de puissance (PD) en prenant pour hypothèse que la surface d'évaluation se situe dans le champ lointain

Note 1 à l'article: Selon l'approximation de l'onde plane équivalente, $PD = 377 \times H^2 = E^2/377$.

Note 2 à l'article: Le présent document fournit les critères de validité de l'approximation de l'onde plane équivalente en utilisant l'algorithme de reconstruction appliqué; voir 7.4.2.1 et Annexe H.

Note 3 à l'article: Certains documents et réglementations nationales utilisent le terme associé "densité de puissance équivalente d'onde plane", qui, aux fins de l'évaluation uniforme de la conformité, s'applique indépendamment du fait que la surface d'évaluation se trouve ou non dans le champ lointain. Dans un cas comme dans l'autre, $377 \times H^2$ et $E^2/377$ doivent être inférieurs ou égaux à la valeur limite de densité de puissance applicable.

3.1.7

débit d'absorption spécifique

DAS

mesure du débit auquel l'énergie est absorbée par unité de masse dans un corps humain lorsqu'il est exposé à un champ électromagnétique de radiofréquences

Note 1 à l'article: Le DAS dans le milieu tissulaire équivalent peut être déterminé à l'aide du taux d'augmentation de la température ou par des mesures du champ E, d'après la Formule (3) et la Formule (4)

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (3)$$

$$SAR = c_h \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{t=0} \quad (4)$$

où:

DAS est le débit d'absorption spécifique, en watts par kilogramme;

E est la valeur efficace de l'amplitude du champ électrique dans le milieu tissulaire équivalent, en volts par mètre;

σ est la conductivité électrique du milieu tissulaire équivalent, en siemens par mètre;

ρ est la masse volumique du milieu tissulaire équivalent, en kilogrammes par mètre cube;

c_h est la capacité thermique spécifique du milieu tissulaire équivalent, en joules par kilogramme-kelvin;

$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{t=0}$ est la dérivée initiale dans le temps de la température dans le milieu tissulaire équivalent, en kelvin par seconde.

Note 2 à l'article: Une définition plus générale indique que le DAS est la dérivée dans le temps de l'énergie incrémentielle (dW) absorbée par (dissipée dans) une masse incrémentielle (dm) contenue dans un volume élémentaire (dV) d'une masse volumique donnée (ρ), selon la Formule (5)

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho dV} \right) \quad (5)$$

Note 3 à l'article: Le DAS est exprimé en watt par kilogramme (W/kg).

3.1.8

rapport d'exposition

rapport de la mesure d'exposition à la limite d'exposition correspondante à une fréquence et un emplacement de fonctionnement donnés

Note 1 à l'article: Le rapport d'exposition peut être exprimé en pourcentage.

3.1.9**rapport d'exposition totale**

somme de tous les rapports d'exposition applicables pour la transmission simultanée du signal à un emplacement donné

3.1.10**exposition prudente****estimation prudente**

<de l'exposition> estimation de l'exposition, y compris les incertitudes spécifiées dans le présent document, représentative et légèrement plus élevée que celle prévue dans la tête ou le corps d'une majorité significative de la population humaine pendant l'usage prévu d'un dispositif de transmission sans fil

3.2 Paramètres spatiaux, physiques et géométriques associés aux indicateurs d'exposition**3.2.1****zone de moyennage**

A_{av}

taille nominale de la zone utilisée pour le calcul de la sPD (3.1.2)

Note 1 à l'article: Sur une surface d'évaluation plane, la sPD est calculée comme le rapport de la densité de puissance (3.1.1) intégrée sur la zone de moyennage A_{av} . Sur une surface d'évaluation non plane, la zone de moyennage indique les dimensions de la projection de la zone d'intégration de la densité de puissance sur une surface plane.

Note 2 à l'article: Pour plus d'informations sur le moyennage, voir 8.4 de l'IEC/IEEE 63195-2:2021.

3.2.2**région de mesure**

surface ou volume dans lequel les mesures du champ sont réalisées

Note 1 à l'article: Si la région de mesure et la surface d'évaluation (voir 3.2.3) sont différentes, les données de la surface d'évaluation sont déduites des données relevées dans la région de mesure au moyen d'algorithmes de reconstruction.

Note 2 à l'article: Les dimensions, la forme et l'orientation de la région de mesure sont déterminées par le fabricant de l'équipement d'essai en fonction de la méthodologie de mesure et des conditions de montage d'essai exigées pour évaluer le DUT.

3.2.3**surface d'évaluation**

surface virtuelle pour l'évaluation de la densité de puissance moyennée dans l'espace (sPD) émise par un DUT

Note 1 à l'article: Les surfaces d'évaluation habituelles qui peuvent s'appliquer dans le présent document sont l'enveloppe interne du fantôme SAM avec ajout d'un pavillon, ou une surface plane avec une extension finie ou infinie.

Note 2 à l'article: Il convient que l'évaluation de la $psPD$ (3.1.3) sur la surface d'évaluation donne une estimation prudente (3.1.10) de l'exposition.

Note 3 à l'article: Dans la pratique, une surface d'évaluation peut être différente d'une surface ou d'une zone de mesure.

3.2.4**distance d'évaluation**

distance entre le DUT et la surface d'évaluation

Note 1 à l'article: Pour l'évaluation de dispositifs portés sur le corps réalisée à l'aide d'un fantôme virtuel plat, la distance d'évaluation s'étend du DUT jusqu'à la surface interne du fantôme virtuel (c'est-à-dire la distance de séparation (3.2.5) plus les 2 mm d'épaisseur de l'enveloppe d'un fantôme virtuel).

3.2.5

distance de séparation

distance entre le DUT et la surface externe d'un fantôme virtuel

3.2.6

pavillon

auricula

partie saillante cartilagineuse de l'oreille externe, composée de l'hélix, du lobule et de l'anthélix

Note 1 à l'article: Le fantôme SAM comporte un pavillon représentatif.

3.2.7

impédance de champ

impédance d'onde

rapport de la norme du vecteur du champ électrique (champ E) à la norme du vecteur du champ magnétique (champ H) en un point de l'espace

Note 1 à l'article: Dans l'air du champ lointain, l'impédance de champ est égale à l'impédance caractéristique de l'espace libre, η_0 . Dans le champ proche réactif, l'impédance de champ peut être significativement différente de l'impédance caractéristique de l'espace libre et elle peut varier fortement selon l'emplacement.

3.2.8

champ proche

région couverte par le champ proche réactif et le champ proche rayonné

Note 1 à l'article: Voir également la définition du champ proche réactif et du champ proche rayonné en 3.2.10 et 3.2.9, respectivement.

3.2.9

champ proche rayonné

région de l'espace entre le champ proche réactif et le champ lointain, où les composantes prépondérantes du champ électromagnétique correspondent à une propagation de l'énergie, et où la répartition du champ en fonction de la direction dépend principalement de la distance par rapport à l'antenne

Note 1 à l'article: Dans le champ proche rayonnant, la composante hors phase (c'est-à-dire évanescence) du champ électromagnétique décroît et la composante en phase (c'est-à-dire qui se propage) du champ électromagnétique s'accroît.

[SOURCE: IEC 60050-712:1992, 712-02-04, modifié – Dans le terme, "rayonnant" a été remplacé par "rayonné". Dans la définition, le terme "la région du" a été supprimé avant "champ proche" et "champ lointain". La note a été remplacée par une nouvelle Note à l'article.]

3.2.10

champ proche réactif

région de l'espace située au voisinage immédiat d'une antenne, où les composantes prépondérantes des champs électriques et magnétiques sont celles qui correspondent à un échange d'énergie réactive entre l'antenne et le milieu environnant, et où les composantes des champs électriques et magnétiques présentent une différence de phase de 90°

[SOURCE: IEC 60050-712:1992, 712-02-01, modifié – Dans la définition, la différence de phase des composantes des champs électriques et magnétiques a été ajoutée.]

3.2.11**champ lointain**

région du champ électromagnétique d'une antenne, où les composantes prépondérantes du champ sont celles qui correspondent à une propagation de l'énergie, où la répartition du champ en fonction de la direction dépend principalement de la distance par rapport au centre géométrique de l'antenne, et où le rapport des composantes prépondérantes des champs électriques et magnétiques est constant et égal à l'impédance d'onde de 377Ω

Note 1 à l'article: Pour les besoins du présent document, la limite du champ proche et du champ lointain est spécifiée en 7.4.2.1.

[SOURCE: IEC 60050-712:1992, 712-02-02, modifié – Dans la définition, la distance par rapport au centre géométrique de l'antenne a été clarifiée et une phrase a été ajoutée pour le rapport des composantes des champs électriques et magnétiques. Les notes ont été remplacées par une nouvelle Note à l'article.]

3.3 Instrumentation de mesure, sonde de champ et paramètres de traitement des données

3.3.1**mesure de la densité de puissance**

évaluation de la densité de puissance (PD) (3.1.1) à l'aide d'un appareil de mesure et éventuellement au moyen de la reconstruction

3.3.2**reconstruction**

utilisation d'algorithmes pour transformer les champs mesurés en densité de puissance au niveau de la surface d'évaluation

Note 1 à l'article: Les algorithmes de reconstruction incluent une ou plusieurs des techniques suivantes:

- méthodologies de récupération des composantes de champ et des densités de puissance (c'est-à-dire déterminées à l'aide de la reconstruction de champ) à partir des données mesurées (par exemple, récupération de la phase à partir de l'amplitude, ou récupération du champ H à partir du champ E ou inversement);
- transformation directe et transformation inverse afin d'évaluer le champ sur d'autres surfaces que celles des mesures.

3.3.3**transformation inverse**

transformation des champs mesurés vers la source (c'est-à-dire à contresens de la direction de propagation)

3.3.4**transformation directe**

transformation des champs mesurés à partir de la source (c'est-à-dire dans la direction de la propagation)

3.3.5**sonde de champ****sonde**

dispositif capable de mesurer le champ électrique et/ou le champ magnétique

Note 1 à l'article: Une sonde de champ est constituée d'un ou plusieurs capteurs de sonde et d'une ligne de transmission conductrice ou non conductrice (fibronique, par exemple) qui envoie le signal mesuré à la l'électronique de lecture.

Note 2 à l'article: Une sonde de champ peut comprendre un boîtier physique et des composants électroniques.

3.3.6**capteur de sonde**

élément (par exemple petit dipôle ou petite antenne cadre) qui reçoit un champ électrique, un champ magnétique ou une densité de puissance à un point de l'espace

Note 1 à l'article: Une sonde de champ contient un ou plusieurs capteurs de sonde.

3.3.7**système de balayage**

système mécanique, électromécanique ou électronique, ou combinaison de ces éléments, capable de placer la sonde de champ ou la sonde de champ multiple à des emplacements spécifiés avec une exactitude connue

3.3.8**sonde de champ multiple**

<système> dispositif constitué de plusieurs sondes de champ, disposées, orientées et excitées de manière à obtenir un champ électrique prévu, un champ magnétique prévu ou les deux simultanément

Note 1 à l'article: Les sondes de champ multiples d'un système sont habituellement identiques et congruentes par translation ou par rotation autour d'un axe. De plus, elles sont en général régulièrement espacées par des lignes de transmission conductrices ou non conductrices qui envoient le ou les signaux mesurés aux appareils électroniques de lecture.

3.3.9**phaseur**

nombre complexe exprimant l'amplitude et la phase d'une grandeur variable dans le temps

Note 1 à l'article: Sauf spécification contraire, la notation phasorielle n'est utilisée que dans le contexte de systèmes linéaires alternatifs en régime permanent.

Note 2 à l'article: Dans des coordonnées polaires, un phaseur peut être exprimé par $Ae^{j\theta}$, où A est l'amplitude et θ est l'angle de phase.

3.3.10**sonde de phaseur**

sonde qui, avec les appareils électroniques de lecture, permet de mesurer le phaseur d'un vecteur de champ magnétique ou d'un vecteur de champ électrique

3.3.11**isotropie axiale**

écart maximal de la densité de puissance mesurée en faisant pivoter la source ou l'extrémité de la sonde de 360° autour de son axe majeur, le vecteur de propagation (vecteur k) de l'onde plane incidente étant parallèle à l'axe de la sonde

3.3.12**isotropie hémisphérique****isotropie de la sonde**

rapport de l'indication la plus élevée à l'indication la plus faible de la sonde exposée à une intensité de champ constante lorsque l'orientation de la sonde varie dans la plage d'angles pertinents couvrant les angles d'incidence potentiellement couverts pendant les essais du DUT

Note 1 à l'article: Pour certaines technologies de sonde, plusieurs mesures réalisées avec différentes orientations de sonde suivies d'une évaluation sont exigées afin de déterminer l'orientation du vecteur de champ (par exemple, voir Pfeifer et al. [4]); l'isotropie hémisphérique peut être obtenue à partir de ces résultats.

3.3.13**couplage croisé**

lecture d'un signal au niveau d'un accès de capteur du fait d'une mesure au niveau d'un autre capteur dans une sonde de champ

Note 1 à l'article: Le couplage croisé est le résultat d'une isolation imparfaite des signaux. Le couplage croisé peut se produire le long des lignes de transmission en provenance du capteur ou dans l'électronique d'acquisition de données.

3.3.14**erreur de linéarité**

écart maximal d'une grandeur mesurée par rapport aux valeurs attendues spécifiées par une ligne de référence sur la plage de mesure

3.3.15**dérive de mesure**

variation continue ou incrémentielle de la grandeur mesurée dans le temps, en raison de modifications des propriétés métrologiques d'un instrument de mesure

Note 1 à l'article: Elle est à différencier de la dérive du DUT, traitée en 7.4.4.

3.3.16**électronique de lecture**

composant du système de mesure qui se connecte à la sonde de champ électrique ou magnétique et permet une conversion des valeurs mesurées vers le postprocesseur du système de mesure

3.3.17**temps de réponse**

temps nécessaire à l'équipement de mesure pour atteindre 90 % de sa valeur finale après une variation brusque du signal d'entrée

3.3.18**sensibilité d'un système de mesure**

rapport de l'amplitude de la réponse du système (par exemple, en tension) à l'amplitude de la grandeur mesurée (par exemple, l'intensité du champ électrique au carré)

3.3.19**rapport signal sur bruit**

amplitude relative du signal souhaité par rapport au total de tous les signaux non souhaités dans une mesure

Note 1 à l'article: Le rapport signal sur bruit est souvent exprimé en décibels (dB).

3.3.20**soutien de dispositif**

fixation constituée de matériau diélectrique à faible perte, utilisée pour maintenir le DUT dans la position d'essai exigée pendant la mesure de la densité de puissance

3.3.21**diffusion**

déviations des champs électromagnétiques provoquant une variation de la distribution des champs locaux et de la direction de propagation

Note 1 à l'article: La diffusion peut être provoquée par l'équipement de mesure ou par l'environnement.

3.3.22**validation**

vérification (3.3.24), où les exigences spécifiées sont adéquates pour un usage déterminé

[SOURCE: ISO/IEC 17025:2017, 3.9 [5]]

3.3.23

validation du système

validation (3.3.22) que l'exactitude du système de mesure est suffisante pour une utilisation conforme aux exigences du présent document, y compris la validation que le système de mesure fonctionne dans les limites de l'incertitude de mesure indiquée

Note 1 à l'article: Même si la validation d'un système peut être réalisée par les utilisateurs de ce système, le processus est généralement complexe, technique et long. C'est pourquoi celui-ci est dans certains cas effectué par le fabricant du système concerné.

3.3.24

vérification

fourniture de preuves tangibles qu'une entité donnée satisfait à des exigences spécifiées

[SOURCE: ISO/IEC 17025:2017, 3.8 [5]]

3.3.25

vérification relative du système

vérification (3.3.24) de la répétabilité du système de mesure à l'aide d'une source ayant une valeur de référence avant d'effectuer des essais de conformité

3.3.26

vérification absolue du système

vérification (3.3.24) de l'exactitude absolue d'un système de mesure à l'aide d'une source ayant une valeur cible absolue traçable

Note 1 à l'article: Les vérifications absolues du système sont effectuées sur le site de l'utilisateur.

Note 2 à l'article: L'un des objectifs de la vérification absolue du système est de vérifier que l'expédition et l'installation sur le site de l'utilisateur n'ont eu aucune incidence sur les performances du système de mesure.

3.4 Paramètres de puissance RF

3.4.1

puissance de sortie

puissance à la sortie de l'émetteur RF lorsque l'antenne, ou une charge avec la même impédance d'entrée que l'antenne, est connectée à celui-ci

3.4.2

puissance conduite

puissance fournie par l'amplificateur de puissance du dispositif à une charge adaptée de 50 Ω

3.4.3

puissance acceptée

puissance nette

puissance fournie à une antenne

Note 1 à l'article: La puissance acceptée, P_{acc} , est inférieure à la puissance incidente, P_i (mesurée dans une charge de 50 Ω), en raison de la désadaptation de l'antenne d'après $P_{acc}/P_i = (1 - |S_{11}|^2)$, où S_{11} est le coefficient de réflexion de l'antenne.

3.4.4

puissance isotrope rayonnée équivalente

PIRE

produit de la puissance fournie par un émetteur radioélectrique à une antenne, par le gain isotrope de l'antenne dans une direction donnée

Note 1 à l'article: Même si cela n'est pas indiqué dans les définitions de l'IEV ou de l'ITU, certains ouvrages emploient le terme "puissance isotrope rayonnée efficace" comme synonyme.

[SOURCE: IEC 60050-712:2021, 712-02-51]

3.4.5**puissance totale rayonnée****TRP**

intégrale de la puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) d'une antenne dans toutes les directions en champ lointain

Note 1 à l'article: La *TRP* est donnée par la Formule (6), où ϕ et θ sont respectivement les angles d'azimut et d'élévation dans un système de coordonnées sphériques.

$$TRP = \frac{1}{4\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} EIRP(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (6)$$

Note 2 à l'article: Si l'antenne était contenue dans une sphère parfaitement absorbante, la *TRP* serait la puissance absorbée par cette sphère.

Note 3 à l'article: La *TRP* est liée à la puissance acceptée, P_{acc} , et au rendement, η_{eff} , par la formule $TRP = \eta_{eff} \times P_{acc}$.

Note 4 à l'article: L'abréviation "TRP" est dérivée du terme anglais développé correspondant "total radiated power".

3.5 Paramètres techniques de fonctionnement et d'antenne du dispositif d'essai**3.5.1****mode de fonctionnement**

protocole ou norme sans fil utilisé par un dispositif pour communiquer avec un autre terminal ou réseau hôte

3.5.2**canal****canal RF****canal de fréquences**

partie du spectre des fréquences destinée à être utilisée pour une transmission de signaux et qui peut être déterminée par deux limites spécifiées, ou par sa fréquence centrale et la largeur de bande associée, ou par toute indication équivalente

Note 1 à l'article: Le nombre de canaux RF et la largeur de bande de canal correspondante peuvent varier entre les différentes technologies sans fil et sont subordonnés aux attributions de fréquences à l'échelle nationale. Pour les besoins du présent document, les mesures de la densité de puissance sont réalisées au niveau de canaux spécifiques; par exemple, canaux supérieur, médian et inférieur de la bande de transmission.

[SOURCE: IEC 60050-701:1988, 701-02-05]

3.5.3**bande de fréquences**

plage de fréquences d'émission associée à un mode de fonctionnement de communication sans fil spécifique

Note 1 à l'article: La plage de fréquences d'émission dépend des attributions de spectre (à l'échelle nationale).

Note 2 à l'article: Le mode de fonctionnement est également appelé "technologie d'accès radio (RAT)".

3.5.4**sous-réseau d'antenne**

sous-ensemble d'éléments rayonnants en réseau qui fonctionnent collectivement

Note 1 à l'article: Les éléments d'antenne peuvent être utilisés séparément par deux sous-réseaux ou plus.

3.5.5

réseau

antenne en réseau

antenne réseau

antenne constituée par un ensemble d'éléments rayonnants généralement identiques, dont les positions, les orientations et les alimentations sont déterminées pour obtenir des caractéristiques de rayonnement déterminées

Note 1 à l'article: L'IEV comporte également un article pour "antenne en réseau à commande de phase" (IEV 712-03-20): antenne en réseau dont on fait varier l'orientation du faisceau ou la forme du diagramme de rayonnement en agissant sur les phases relatives de l'alimentation des divers éléments rayonnants du réseau.

[SOURCE: IEC 60050-712:1992, 712-01-05]

3.5.6

liste de codage

description de toutes les combinaisons d'amplitude et de phase d'alimentation des éléments applicables prises en charge par un réseau ou sous-réseau d'antenne dans un DUT

Note 1 à l'article: L'IEC/IEEE 63195-2:2021 définit la liste de codage comme l'ensemble de tous les vecteurs d'excitation possibles. Les vecteurs d'excitation correspondent à toutes les combinaisons d'amplitude et de phase d'alimentation des éléments applicables.

3.5.7

signaux corrélés

signaux donnant une intégrale de corrélation non nulle dans le domaine temporel à un instant donné

Note 1 à l'article: Pour plus d'informations sur cette définition, voir l'IEC TR 62630:2010 [6].

3.5.8

capteur de proximité

capteur ou combinaison de capteurs à l'intérieur du DUT utilisée pour détecter la proximité de l'utilisateur afin de limiter la puissance de l'émetteur en vue de faciliter la conformité aux limites d'exposition aux fréquences radioélectriques

3.5.9

rendement

rapport de la puissance totale rayonnée (TRP) (3.4.5) d'une antenne à la puissance acceptée (3.4.3) par l'antenne

Note 1 à l'article: La TRP est liée à la puissance acceptée, P_{acc} , et au rendement, η_{eff} , par la formule

$$TRP = \eta_{eff} \times P_{acc}$$

3.5.10

moyennage temporel

intégration temporelle du signal mesuré et normalisé à la période d'intégration

3.6 Configurations physiques des dispositifs d'essai

3.6.1

dispositif en essai

DUT

dispositif d'essai

dispositif qui est soumis à l'essai conformément aux procédures décrites dans le présent document pour déterminer le niveau de densité de puissance

Note 1 à l'article: Un DUT peut en outre être catégorisé comme étant un dispositif porté sur le corps, un dispositif supporté par le corps, un dispositif de bureau, un dispositif frontal, un dispositif portable, un dispositif porté sur un membre, un dispositif intégré aux vêtements ou un dispositif générique.

Note 2 à l'article: L'abréviation "DUT" est dérivée du terme anglais développé correspondant "device under test".

3.6.2**multibande**

<dispositif de communication sans fil> capable de fonctionner dans plusieurs bandes de fréquences

3.6.3**dispositif générique**

dispositif qui n'appartient à aucune des catégories de dispositifs spécifiques

Note 1 à l'article: Les catégories de dispositifs spécifiques sont définies en 3.6.5, 3.6.6, 3.6.7, 3.6.8, 3.6.9, 3.6.10 et 3.6.11.

3.6.4**usage prévu**

usage auquel un dispositif est destiné, pour l'ensemble des fonctions disponibles, conformément aux spécifications, instructions et informations fournies par le fabricant du DUT dans la documentation utilisateur

Note 1 à l'article: Selon le CENELEC [7] [8], les évaluations de conformité pour l'Europe tiennent compte de toutes les conditions de fonctionnement prévues ainsi que des conditions d'utilisation raisonnablement prévisibles.

3.6.5**dispositif porté sur le corps**

dispositif comprenant un ou plusieurs émetteurs ou émetteurs-récepteurs sans fil qui est placé à proximité immédiate du torse ou des membres d'une personne (à l'exclusion de la tête) au moyen d'un accessoire de portage pendant son usage prévu ou l'exécution de ses fonctions radioélectriques

3.6.6**dispositif supporté par le corps**

dispositif comprenant un ou plusieurs émetteurs ou émetteurs-récepteurs sans fil dont l'usage prévu inclut la transmission, une partie du dispositif étant placée contre le corps de l'utilisateur

3.6.7**dispositif de bureau**

dispositif placé ou monté sur un bureau, une table ou une structure de support similaire, équipé d'antennes destinées à être utilisés à 200 mm ou moins du corps humain

3.6.8**dispositif frontal**

dispositif portatif comprenant un ou plusieurs émetteurs ou émetteurs-récepteurs sans fil fonctionnant à proximité immédiate (à moins de 200 mm) du visage

3.6.9**dispositif portatif**

dispositif portable qui fonctionne dans la main de l'utilisateur à une distance supérieure à 200 mm de la tête ou du torse pendant son usage prévu

3.6.10**dispositif portable**

dispositif comprenant un ou plusieurs émetteurs ou émetteurs-récepteurs sans fil qui peut être posé sur les genoux de l'utilisateur et qui n'est pas destiné à être tenu à la main

Note 1 à l'article: Les types de dispositifs portables incluent les ordinateurs portables (notebooks), généralement composés d'une partie clavier et d'une partie-écran distinctes reliées par une charnière, et les tablettes qui sont généralement constituées d'une seule partie, la partie-écran servant également d'interface de saisie à l'aide d'un stylet ou d'un clavier virtuel.

3.6.11

dispositif monté sur un membre

dispositif comprenant un ou plusieurs émetteurs ou émetteurs-récepteurs sans fil dont l'usage prévu implique qu'il soit sangle au bras ou à la jambe de l'utilisateur lors de la transmission

Note 1 à l'article: Les types de dispositifs montés sur un membre incluent les dispositifs montés au poignet, à la cheville et sur l'avant-bras.

3.6.12

accessoire

dispositif supplémentaire qui ne fait pas partie d'un dispositif ou appareil principal, mais qui est nécessaire à son fonctionnement ou pour lui apporter des caractéristiques particulières

EXEMPLE 1 Accessoires visant à maintenir, fixer ou encore transporter, porter ou attacher le dispositif, ainsi qu'à assurer un espacement par rapport au corps (par exemple un clip de ceinture, une dragonne ou autre sangle, ou un cordon conçu pour porter le dispositif en collier).

EXEMPLE 2 Accessoires électroniques destinés à l'exécution de tâches spécialisées ou fournissant des fonctionnalités supplémentaires (par exemple modules GPS, imprimantes hors-bord, lecteurs MPEG-1 Audio Layer 3 (MP3), caméras ou dispositifs de visualisation).

EXEMPLE 3 Accessoires électroniques fournissant une entrée ou une sortie audio ou vidéo (par exemple casques, microphones, caméras).

EXEMPLE 4 Accessoires fournissant une capacité RF améliorée au dispositif (par exemple antennes d'origine, de remplacement ou auxiliaires).

EXEMPLE 5 Batteries et composants d'alimentation en courant continu (CC) associés.

EXEMPLE 6 Combinaisons d'accessoires dans lesquelles au moins deux des éléments des exemples précédents sont associés dans un seul composant (par exemple un clip de ceinture avec technologie de communication sans fil à courte distance intégrée et câble audio "fibre amorce" relié au dispositif).

[SOURCE: IEC 60050-151:2001, 151-11-24]

3.7 Paramètres d'incertitude

3.7.1

incertitude

intervalle de confiance de la valeur évaluée

3.7.2

incertitude type

écart-type estimé du résultat d'une mesure ou d'une simulation, égal à la racine carrée positive de la variance estimée

3.7.3

incertitude composée

écart-type estimé du résultat d'une mesure ou d'une simulation obtenu en combinant les incertitudes types individuelles des évaluations de type A et de type B à l'aide de la méthode de "somme quadratique" qui consiste à combiner les écarts-types obtenus en prenant la racine carrée positive des variances estimées

3.7.4

incertitude élargie

grandeur qui définit un intervalle concernant le résultat d'une mesure ou d'une simulation, prévu pour englober une distribution de valeurs dans un intervalle de confiance spécifié qui peut être raisonnablement être attribué au mesurande

3.7.5

évaluation de l'incertitude

évaluation de l'incertitude par l'analyse statistique de séries d'observations (type A) ou par d'autres moyens (type B)

4 Symboles et termes abrégés

4.1 Symboles

4.1.1 Grandeurs physiques

Le Système International d'unités SI est utilisé dans l'ensemble du document.

Symbole	Grandeur	Unité	Dimensions
α	affaiblissement linéique	inverse du mètre	1/m
P	puissance	watt	W
J	densité de courant	ampère par mètre carré	A/m ²
σ	conductivité électrique	siemens par mètre	S/m
E	intensité du champ électrique	volt par mètre	V/m
f	fréquence	hertz	Hz
PD	densité de puissance	watt par mètre carré	W/m ²
S	vecteur de Poynting	watt par mètre carré	W/m ²
H	intensité du champ magnétique	ampère par mètre	A/m
ρ	masse volumique	kilogramme par mètre cube	kg/m ³
δ	profondeur de pénétration	mètre	m
μ	perméabilité	henry par mètre	H/m
sPD	densité de puissance moyennée dans l'espace	watt par mètre carré	W/m ²
sPD_{n+}	densité de puissance moyennée dans l'espace dans la direction de propagation de la normale à la surface	watt par mètre carré	W/m ²
sPD_{tot+}	densité de puissance de propagation totale moyennée dans l'espace	watt par mètre carré	W/m ²
sPD_{mod+}	densité de puissance totale moyennée dans l'espace compte tenu des effets du champ proche réactif	watt par mètre carré	W/m ²
$psPD$	densité de puissance maximale moyennée dans l'espace	watt par mètre carré	W/m ²
$psPD_{n+}$	densité de puissance maximale moyennée dans l'espace dans la direction de propagation de la normale à la surface	watt par mètre carré	W/m ²
$psPD_{tot+}$	densité de puissance de propagation totale maximale moyennée dans l'espace	watt par mètre carré	W/m ²
$psPD_{mod+}$	densité de puissance totale maximale moyennée dans l'espace compte tenu des effets du champ proche réactif	watt par mètre carré	W/m ²
c_h	capacité thermique massique	joule par kilogramme-kelvin	J/(kg K)
ε	permittivité	farad par mètre	F/m
DAS	débit d'absorption spécifique	watt par kilogramme	W/kg
T	température	kelvin	K
λ	longueur d'onde	mètre	m

NOTE Dans le présent document, la température est exprimée en degrés Celsius, définie par:
 $T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15$.

4.1.2 Constantes

Symbole	Constante physique	Amplitude
c	vitesse de la lumière dans le vide	$2,998 \times 10^8$ m/s
η_0	impédance caractéristique de l'espace libre	376,73 Ω
ϵ_0	permittivité de l'espace libre	$8,854 \times 10^{-12}$ F/m
μ_0	perméabilité de l'espace libre	$4\pi \times 10^{-8}$ H/m

4.2 Termes abrégés

2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
B-M (Back-to-Mouth)	De l'arrière à la bouche
CAO	Conception assistée par ordinateur
CP (Cyclic Prefix)	Préfixe cyclique
CW (Continuous Wave)	Onde entretenue
DFT-s (Discrete Fourier Transform spread)	Dispersion de transformation de Fourier discrète
DUT (Device Under Test)	Dispositif en essai
Champ E	Champ électrique
PIRE	Puissance isotrope rayonnée équivalente
CEM	Compatibilité électromagnétique
ER (Exposure Ratio)	Rapport d'exposition
ERP (Ear Reference Point)	Point de référence de l'oreille
FDTD (Finite-Difference Time-Domain)	Différences finies dans le domaine temporel
GTEM	Gigahertz Transverse Electromagnetic
Champ H	Champ magnétique
ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)	Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants
MIMO (Multiple Input Multiple Output)	Entrées multiples et sorties multiples
N-F (Neck-to-Front)	Du cou au front
NR (New Radio)	Nouvelle radio
OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)	Multiplexage par répartition en fréquence orthogonale
PAPR (Peak-to-Average Power Ratio)	Rapport de la puissance maximale sur la puissance moyenne
PD (Power Density)	Densité de puissance
MAQ (Quadrature Amplitude Modulation)	Modulation d'amplitude en quadrature
MDP-4	Modulation par quadrature de phase
RB (Resource Block)	Bloc de ressource
RF	Radiofréquence, fréquence radioélectrique
RMS (Root Mean Square)	Moyenne quadratique, valeur efficace
RSS (Root Sum Square)	Somme quadratique
SAM (Specific Anthropomorphic Mannequin)	Mannequin anthropomorphe spécifique
DAS	Débit d'absorption spécifique
TER (Total Exposure Ratio)	Rapport d'exposition totale
TRP (Total Radiated Power)	Puissance totale rayonnée
VNA (Vector Network Analyser)	Analyseur de réseau vectoriel

5 Guide de démarrage rapide et application du présent document

5.1 Guide de démarrage rapide

Le guide de démarrage rapide représenté à la Figure 1 et la liste de vérification du plan d'évaluation présentée dans le Tableau 1 donnent un bref aperçu de la procédure de mesure de la densité de puissance. Pour les détails relatifs à chaque étape, se référer au paragraphe correspondant spécifié sur la Figure 1 et dans le Tableau 1.

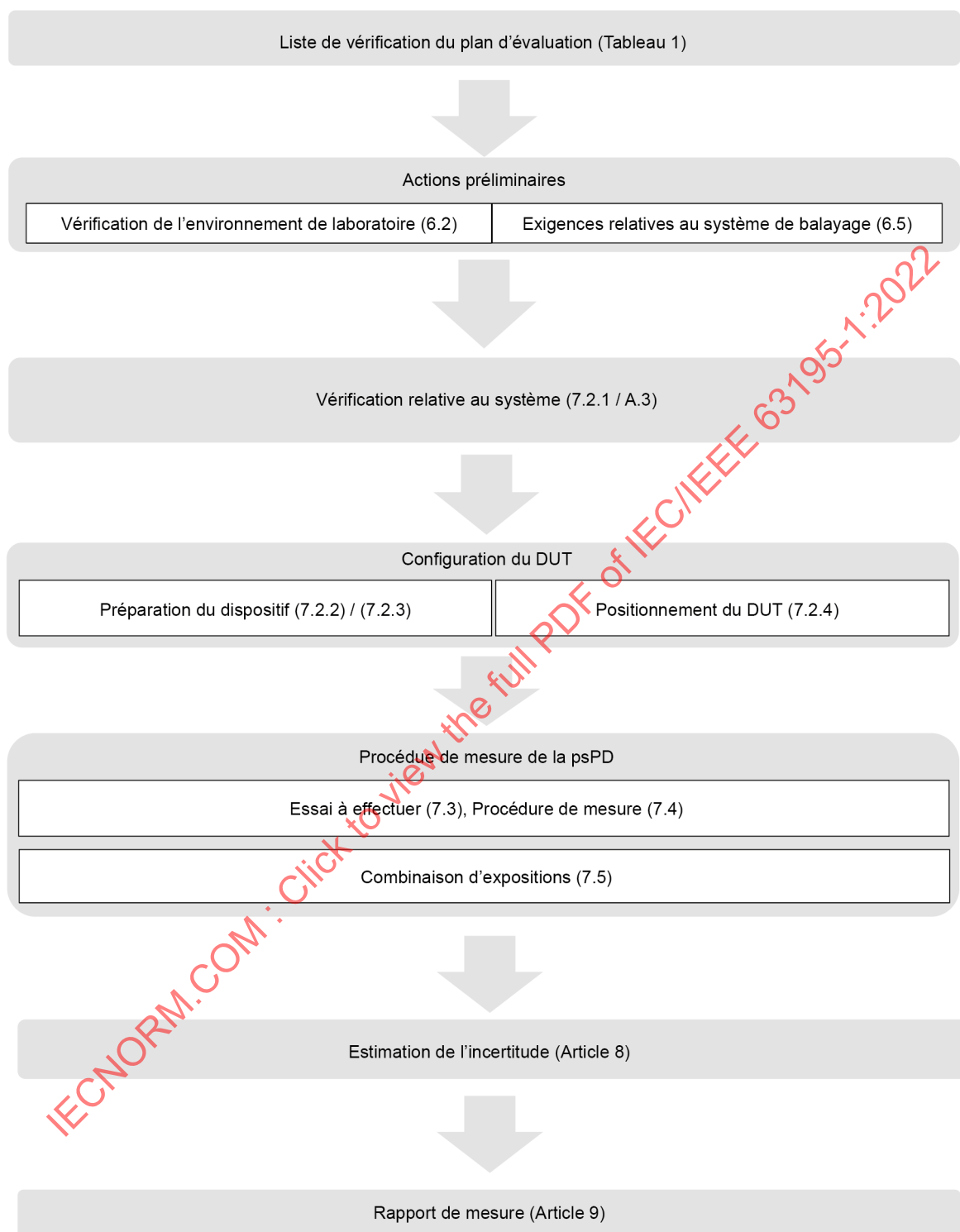
NOTE Dans le champ lointain d'une source à des distances de séparation inférieures à 200 mm, des procédures d'essai et un système de mesure plus simples peuvent être utilisés, comme cela est décrit dans l'IEC 62311:2019 [9]².

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC/IEEE 63195-1:2022

² Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

Tableau 1 – Liste de vérification du plan d'évaluation

Stade	Etapes d'évaluation	Action
Liste de vérification du plan d'évaluation Planification des configurations de mesure	– Quel type de dispositif est évalué? – Examen des antennes, des options d'orientation de faisceau possibles et des technologies sans fil prises en charge, antenne unique ou exigence de combinaisons d'expositions en provenance de plusieurs antennes. – Quelles sont les surfaces d'évaluation applicables? – En travaillant dans des conditions de laboratoire et en suivant les bonnes pratiques de laboratoire ainsi que la documentation, préparer l'exécution de l'évaluation nécessaire.	Suivre la liste de vérification du plan d'évaluation.
Actions préliminaires et vérification relative du système	– L'environnement doit être mesuré et les données doivent être enregistrées (6.2). – Une vérification relative du système doit être effectuée afin de vérifier que les composants du système fonctionnent correctement (Article A.3).	– Ces actions doivent être réalisées avant le lancement d'un projet et répétées conformément au 7.2.1.
Configuration du DUT Préparation du DUT	Le protocole d'évaluation de la <i>psPD</i> identifie les configurations applicables qui doivent être soumises à l'essai. Les étapes de base comprennent: – la préparation du DUT par l'établissement d'une connexion à un simulateur de réseau; – la configuration du DUT pour fonctionner aux fréquences d'essai, dans les modes sans fil et dans les conditions d'exposition appropriés; – la configuration du DUT pour fonctionner selon les options d'orientation de faisceau appropriées; – le positionnement du DUT par rapport à la région de mesure.	S'assurer que le DUT est correctement configuré, qu'il rayonne de façon appropriée pour le cas d'essai et qu'il est correctement positionné par rapport à la région de mesure.
Procédures de mesure de la densité de puissance Procédure générale pour la <i>psPD</i>	– Ce stade correspond à la procédure de mesure effective de la <i>psPD</i>. – La procédure est itérative pour s'assurer que la valeur la plus élevée de la <i>psPD</i> d'un DUT est mesurée. – Elle s'effectue au moyen d'un processus systématique examinant en conséquence toutes les positions, toutes les configurations et tous les modes de fonctionnement du dispositif dans toutes les bandes de fréquences (7.2.3).	Déterminer la <i>psPD</i> la plus élevée. S'assurer que la justification de la réduction des essais est enregistrée et consignée si elle est utilisée.
Evaluation de l'incertitude	– Des exigences et des formules d'approximation sont fournies (Article 8), permettant d'estimer chaque composante d'incertitude individuelle. – Le bilan d'incertitudes doit couvrir la plage de fréquences appropriée en ce qui concerne les équipements utilisés dans le système de <i>psPD</i>.	Déterminer l'incertitude et compléter le tableau d'incertitude.
Rapport des résultats de <i>psPD</i>	– Le rapport final décrit les résultats des évaluations, fournit une description technique suffisante pour permettre la répétabilité des évaluations effectuées, et consigne les résultats en les comparant aux limites applicables (Article 9). – Le rapport de mesure doit contenir suffisamment de détails et d'informations pour démontrer la conformité aux exigences du présent document.	Préparer le rapport de mesure final tout en satisfaisant aux exigences indiquées à l'Article 9.



IEC

Figure 1 – Guide de démarrage rapide

5.2 Application du présent document

Le présent document et l'IEC/IEEE 63195-2:2021 ont été élaborés en parallèle dans deux groupes de travail mixtes de l'IEC et de l'IEEE en vue d'établir des procédures pour l'évaluation de la conformité aux limites d'exposition à la densité de puissance incidente, en tenant particulièrement compte de l'exposition en provenance de dispositifs sans fil de la nouvelle technologie mobile de cinquième génération (5G) qui fonctionnent dans la plage de fréquences comprise entre 6 GHz et 300 GHz. Le présent document spécifie les procédures de mesure, tandis que l'IEC/IEEE 63195-2:2021 spécifie les procédures de calcul.

Le présent document et l'IEC/IEEE 63195-2:2021 ont été développés dans une période relativement courte de deux ans, à la suite de la documentation dans l'IEC TR 63170:2018 [10] du travail de fond sur les procédures de mesure pour l'évaluation de la conformité à des fréquences supérieures à 10 GHz. En parallèle, l'ICNIRP [2] et le TC 95 de l'ICES de l'IEEE ont revu leurs lignes directrices en matière d'exposition et ont inclus de nouvelles restrictions de base et de nouveaux niveaux de référence pour la plage de fréquences supérieures ou égales à 6 GHz. Elles reposent sur la densité de puissance absorbée/épithéliale ou sur la densité de puissance incidente, respectivement, moyennée sur une zone carrée de 1 cm^2 ou 4 cm^2 .

Le présent document contient toutes les spécifications pertinentes pour l'application des procédures de mesure aux fins d'évaluation de la conformité. Même si certaines parties peuvent être appliquées indépendamment de la norme de calcul IEC/IEEE 63195-2:2021, il fait référence aux méthodes de post-traitement du moyennage de la densité de puissance et de la maximisation de la densité de puissance incidente communes à l'IEC/IEEE 63195-2, mais qui ne sont spécifiées que dans l'IEC/IEEE 63195-2:2021. De même, l'évaluation de la conformité des calculs est décrite dans l'IEC/IEEE 63195-2:2021. Les méthodes décrites dans le présent document sont exigées pour les validations des résultats de modélisation numérique par des mesures.

5.3 Conditions

En raison des contraintes de temps alloué au développement du présent document et de l'IEC/IEEE 63195-2:2021, il était nécessaire de trouver des options pratiques concernant l'interprétation des nouvelles lignes directrices d'exposition pour l'évaluation de la conformité aux nouvelles limites. Ces options portent sur la construction de la zone de moyennage et le calcul de la densité de puissance moyennée dans l'espace sur cette zone de moyennage. En ce qui concerne le calcul de la densité de puissance moyennée dans l'espace, différentes méthodes sont spécifiées dans l'objectif d'assurer la compatibilité avec les évaluations d'exposition obtenues conformément à l'IEC TR 63170:2018 [10] et de prendre en compte les conditions d'exposition autres que l'incidence perpendiculaire dans le champ lointain. L'Annexe I décrit les options et leurs justifications.

Ces options n'empêchent pas l'applicabilité des méthodes spécifiées dans l'IEC/IEEE 63195-2 et le présent document pour l'évaluation de la conformité aux niveaux de référence spécifiés dans les lignes directrices en matière d'exposition.

6 Exigences relatives au système de mesure et au laboratoire

6.1 Exigences générales

Un système de mesure de la densité de puissance est utilisé pour déterminer la densité de puissance maximale moyennée dans l'espace ($psPD$) sur la surface d'évaluation conformément aux méthodes décrites à l'Article 7. Le protocole de mesure du présent document est fondé sur le positionnement mécanique de sondes de champ sur une grille par rapport au DUT afin de balayer la distribution du champ électrique ou la distribution du champ magnétique, ou les deux. Les exigences minimales du système de mesure sont les suivantes:

- a) les mesures doivent être réalisées dans un laboratoire contrôlé (voir 6.2);

- b) le système de mesure doit comprendre la ou les sondes de champ (voir 6.3), l'instrumentation de mesure (voir 6.4), un système de balayage (voir 6.5), un support de DUT (voir 6.6) et un logiciel de post-traitement (voir 6.7). Le logiciel de post-traitement peut inclure des algorithmes de reconstruction de champ;
- c) le système de mesure doit être capable de déterminer la *sPD* sur la surface d'évaluation exigée;
- d) les incertitudes relatives aux composantes de champ et aux résultats de densité de puissance mesurés (c'est-à-dire déterminés à l'aide de la reconstruction de champ) doivent être évaluées et indiquées (voir Article 8);
- e) le système de mesure doit déterminer la *sPD* sur la surface d'évaluation à l'aide des composantes de champ et des densités de puissance mesurées (c'est-à-dire déterminées à l'aide de la reconstruction de champ), dont la *psPD* doit être calculée. L'incertitude du calcul de la *psPD* doit être indiquée d'après l'incertitude des composantes de champ et des densités de puissance mesurées (c'est-à-dire déterminées à l'aide de la reconstruction de champ) (voir Article 8);
- f) la plage dynamique de la *sPD* pour laquelle le bilan d'incertitudes est valide doit être comprise entre au plus 20 % et au moins 200 % (moins de -7 dB à plus de +3 dB) de la limite d'exposition applicable;
- g) le niveau de bruit du système de mesure doit être inférieur d'au moins 10 dB à l'extrémité inférieure de la plage dynamique de la densité de puissance, de sorte que l'influence du bruit sur l'incertitude de mesure soit faible;
- h) l'incertitude élargie maximale ($k = 2$) de l'évaluation de la *psPD* ne doit pas être supérieure à ± 2 dB (-37 % à +58 %) sur la plage dynamique;
- i) la largeur de bande du système de mesure doit être valide pour les signaux et systèmes de communication sans fil soumis à l'essai;
- j) le système de mesure doit avoir un étalonnage valide sur toute la plage de fréquences soumise à l'essai;
- k) le fabricant du système de mesure doit indiquer à l'utilisateur les limites du système conformément au présent document. Cela comprend la plage de fréquences, la largeur de bande, les emplacements de la surface d'évaluation par rapport au DUT, la plage dynamique et l'incertitude de mesure;
- l) les composants du système de mesure qui ont une incidence directe sur l'exactitude de la mesure (les sondes de champ et l'instrumentation de mesure, par exemple) doivent avoir un étalonnage traçable aux normes internationales;
- m) le système de mesure doit être validé comme un système complet et étalonné (voir Article A.5). La validation du système est exigée chaque fois que des modifications sont apportées au système (version du logiciel ou autre type ou version des composants de mesure, par exemple);
- n) lorsque le présent document spécifie explicitement les caractéristiques de performance du système de mesure ou d'une partie du système de mesure, le fabricant du système ou de ses parties, ou l'intégrateur du système, doit documenter la conformité aux dispositions du présent document.

La conformité aux exigences générales susmentionnées doit être documentée par le fabricant du système ou l'intégrateur du système.

NOTE 1 Des procédures d'essai et des systèmes de mesure simplifiés peuvent être utilisés si le corps se situe toujours dans le champ lointain de la source (voir par exemple l'IEC 62311:2019 [9]), qui peut également inclure des distances de séparation inférieures à 200 mm.

NOTE 2 Les lignes directrices de l'ICNIRP en matière de champ électromagnétique à fréquences radioélectriques [2] indiquent que les niveaux de référence (densité de puissance incidente) ne peuvent pas être utilisés dans le champ proche réactif, ce qui signifie qu'il convient d'utiliser à la place des restrictions de base (densité de puissance absorbée). D'après la définition du champ proche réactif donnée par l'ICNIRP, cette limitation concerne les procédures du présent document à des fréquences inférieures à 24 GHz. Le comité d'études 106 de l'IEC et l'ICES de l'IEEE envisagent plus tard une Norme internationale relative à la densité de puissance absorbée ou épithéliale.

NOTE 3 Les méthodes de validation du système sont à l'heure actuelle spécifiées dans le présent document pour la plage de fréquences allant de 6 GHz jusqu'à 100 GHz, ce qui couvre tous les dispositifs actuellement disponibles. L'extension des procédures de validation jusqu'à 300 GHz sera spécifiée dans une révision ultérieure.

NOTE 4 Afin de quantifier la reproductibilité de mesure d'un système, des comparaisons interlaboratoires (Annexe F) à l'aide de sources représentatives des caractéristiques de rayonnement des dispositifs soumis à l'essai peuvent être réalisées.

6.2 Exigences relatives au laboratoire

Les essais doivent être réalisés dans un laboratoire conforme aux exigences suivantes:

- a) le bruit ambiant lors des mesures doit être inférieur à -20 dB (1 %) de la limite de densité de puissance applicable ou du champ maximal mesuré, si cette valeur est plus élevée;
- b) l'influence des réflexions dues aux objets dans le laboratoire (y compris le système de mesure par balayage, les câbles, les parois et le support du DUT) sur les mesures doit être inférieure à -17 dB (2 %) de la limite de densité de puissance applicable. Voir 8.5.9 pour déterminer l'influence des réflexions. Elle doit être évaluée au moins une fois par an;
- c) la température ambiante doit se situer dans la plage pour laquelle l'étalonnage des composants du système est valide et la variation de transmission du DUT par température due à la température ambiante est inférieure à 5 % (par exemple, entre 18°C et 25°C) (voir 8.5.8). Elle doit également varier de moins de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ par rapport à la température ambiante pendant le mesurage;
- d) l'équipement de mesure doit avoir été mis sous tension et préparé dans le laboratoire conformément au temps de stabilisation indiqué par le fabricant.

Le respect de ces exigences relatives au laboratoire doit être documenté dans le rapport de mesure.

6.3 Exigences relatives à la sonde de champ

Le système de mesure comprend une ou plusieurs sondes de champ; les systèmes à sonde de champ multiple peuvent réduire significativement le temps de mesure. Chaque sonde de champ doit satisfaire aux exigences suivantes:

- a) la ou les sondes de champ doivent mesurer le champ électrique ou le champ magnétique, ou les deux;
- b) le niveau de couplage croisé entre les composantes de champ doit être tel que les exigences relatives à l'incertitude élargie maximale données en 6.1 soient respectées;
- c) la sonde de champ doit mesurer la phase du champ, à moins que la surface d'évaluation se situe dans le champ lointain (voir Tableau 2 en 7.4.2.1) ou à moins que des techniques de reconstruction de champ soient appliquées pour estimer correctement la densité de puissance;
- d) la plage dynamique de la sonde de champ doit être telle que les exigences relatives à la plage dynamique du système données en 6.1 soient respectées;
- e) la taille et la construction de la sonde de champ doivent faire en sorte que l'effet de diffusion de la sonde sur les champs émis par le DUT se situe dans l'incertitude élargie de diffusion de la sonde décrite en 8.4.7;
- f) la sonde de champ doit être étalonnée conformément aux exigences de l'Annexe C. La sonde peut être étalonnée séparément du reste du système de mesure si les mêmes caractéristiques d'interface électrique sont utilisées pendant l'étalonnage et pendant les mesures; Il est préférable de ne pas étalonner la sonde séparément du reste du système de mesure. Si la sonde est étalonnée séparément, il convient que l'incertitude d'étalonnage inclue l'interdépendance statistique au moyen d'un instrument de lecture de signaux;
- g) le rapport d'étalonnage de la sonde de champ doit documenter au moins les incertitudes et les restrictions de validité associées du décalage mécanique (8.4.10), de la réponse en fréquence (8.4.3), de la sensibilité, de l'erreur de linéarité (8.4.6), de l'isotropie (8.4.5), du couplage croisé (8.4.4) et de l'influence de l'impédance de champ (8.4.12). Toute influence de ces grandeurs sur la fréquence et sur la largeur de bande doit également être consignée.

La conformité à ces exigences relatives à la sonde de champ doit être documentée par le fabricant du système de mesure.

6.4 Exigences relatives à l'instrumentation de mesure

La sortie de la sonde de champ est traitée par l'instrumentation de mesure, conformément aux exigences suivantes:

- a) l'instrumentation de mesure doit recevoir le signal mesuré par la sonde de champ et le transmettre à un ordinateur pour évaluation;

NOTE L'ordinateur peut être intégré à l'instrumentation de mesure, être séparé de celle-ci, ou les deux.

- b) l'instrumentation de mesure doit être étalonnée. Elle peut être étalonnée séparément de la sonde si les mêmes caractéristiques d'entrée et d'interface électrique sont utilisées pendant l'étalonnage et pendant les mesures.

L'instrumentation de mesure peut procéder à l'amplification, au filtrage en fréquence ou à tout autre traitement du signal. Elle peut également tenir compte de la compression du signal, des non-linéarités de l'amplificateur et d'autres effets non linéaires.

La conformité à ces exigences relatives à l'instrumentation doit être documentée par le fabricant du système de mesure.

6.5 Exigences relatives au système de balayage

6.5.1 Systèmes à sonde unique

Le système de balayage positionne la sonde de champ dans la région de mesure. Les exigences relatives au système de balayage sont les suivantes:

- a) la méthode de balayage doit être consignée, y compris s'il s'agit de balayages bidimensionnels (2D) ou tridimensionnels (3D);
- b) l'algorithme de détermination de la grille de mesure, si une grille fixe n'est pas utilisée, doit être consigné;
- c) le système de balayage doit restreindre les emplacements de la sonde de champ lors de la mesure à la région où l'influence de l'impédance de champ sur la mesure se situe dans les limites de l'incertitude indiquée (voir 8.4.12). Cette incertitude ne doit pas être supérieure à 0,5 dB;
- d) le système de balayage doit être capable de positionner la sonde de champ dans une région de mesure suffisamment grande pour pouvoir déterminer la $psPD$ en tout point de la surface d'évaluation, afin de satisfaire à l'incertitude REC indiquée (voir 8.4.18);
- e) l'exactitude et la répétabilité du positionnement de la sonde de champ doivent être consignées, et elles doivent être suffisantes pour s'assurer que l'incertitude de mesure de la $psPD$ se situe dans les limites de l'incertitude PPO indiquée (voir 8.4.8). La tolérance relative au positionnement de la sonde de champ doit également être suffisante pour combiner les expositions à partir de plusieurs antennes ou de plusieurs émetteurs (voir 7.5);
- f) le système de balayage doit être capable de faire pivoter la sonde de champ, si nécessaire, afin de recueillir les composantes de champ et les densités de puissance exigées (c'est-à-dire déterminées à l'aide de la reconstruction de champ). L'exactitude et la répétabilité de l'orientation de la sonde de champ doivent être consignées;
- g) la résolution du balayage doit être suffisante pour maintenir l'incertitude de mesure de la $psPD$ dans les limites de l'incertitude indiquée;
- h) à chaque emplacement de la sonde de champ, le système de balayage doit être capable de maintenir la sonde de champ en place pendant une durée suffisante par rapport au temps d'intégration, comme cela est déterminé conformément au 8.5.3.

NOTE Le balayage de la région de mesure peut inclure une combinaison de balayages rapides et de balayages complets afin de réduire le temps de mesure, à condition que cela n'augmente pas l'incertitude de mesure. Voir 7.4.1 pour plus d'informations.

La conformité à ces exigences relatives au système de balayage doit être documentée par le fabricant du système de mesure.

6.5.2 Systèmes à sonde de champ multiple

Le système de balayage à sondes de champ multiples présente en général une configuration à espacement régulier qui gère le positionnement relatif des sondes de champ par rapport au DUT, de sorte que la région de mesure soit couverte. Les exigences relatives au système de balayage sont les suivantes:

- a) la méthode de balayage doit être consignée, y compris s'il s'agit de balayages 2D ou 3D;
- b) l'algorithme de détermination de la grille de mesure, s'il ne s'agit pas d'une grille fixe, doit être documenté;
- c) l'incertitude de la position relative des sondes de champ par rapport au DUT doit se situer dans les limites de l'incertitude du décalage de positionnement de la sonde (*PPO*; voir 8.4.8);
- d) le système de balayage doit être capable de couvrir une région de mesure suffisamment grande pour pouvoir déterminer la *psPD* en tout point de la surface d'évaluation;
- e) l'exactitude et la répétabilité du positionnement doivent être consignées, et elles doivent être suffisantes pour s'assurer que l'incertitude de mesure de la *psPD* se situe dans les limites de l'incertitude indiquée. La tolérance relative au positionnement de la sonde de champ doit également être suffisante pour combiner les expositions à partir de plusieurs antennes ou de plusieurs émetteurs (voir 7.5);
- f) le système de balayage doit être capable de faire pivoter les sondes de champ et/ou le DUT, si nécessaire, afin de recueillir les composantes de champ et les densités de puissance exigées (c'est-à-dire déterminées à l'aide de la reconstruction de champ). L'exactitude et la répétabilité de l'orientation des sondes de champ et/ou du DUT doivent être consignées;
- g) la distance de séparation minimale qui assure une contribution suffisamment faible du couplage mutuel de la sonde à l'incertitude, de sorte que l'exigence d'incertitude élargie maximale donnée en 6.1 soit respectée, doit être spécifiée par le fabricant du système;
- h) la résolution du balayage doit être suffisante pour maintenir l'incertitude de mesure de la *psPD* dans les limites de la tolérance indiquée;
- i) pour chaque acquisition, le système de balayage doit être capable de maintenir la sonde de champ ou le DUT ou les deux en place pendant une durée suffisante par rapport au temps d'intégration, comme cela est déterminé conformément au 8.5.3.

NOTE 1 Le balayage de la région de mesure peut inclure une combinaison de balayages rapides et de balayages complets afin de réduire le temps de mesure, à condition que cela n'augmente pas l'incertitude de mesure. Voir 7.4.1 pour plus d'informations.

NOTE 2 Le système de balayage peut être utilisé en combinaison d'un système de positionnement du DUT afin de réduire les incertitudes de mesure telles que les variations de phase et d'amplitude dues à la flexion du câble.

La conformité à ces exigences relatives au système de balayage doit être documentée par le fabricant du système de mesure.

6.6 Exigences relatives au support de dispositif

Le support de dispositif maintient le DUT en position pendant le mesurage. Les exigences relatives au support de dispositif sont les suivantes:

- a) les positions et orientations doivent permettre de mesurer le DUT dans toutes les régions de mesure exigées;
- b) le support de dispositif doit permettre un positionnement et une orientation connus et reproductibles du DUT;
- c) le support de dispositif, y compris sa structure de support, doit être conçu de façon à réduire le plus possible la perturbation des champs provenant du DUT. Les parties du support de dispositif qui sont en contact direct avec le DUT doivent être constituées de matériaux ayant une tangente de perte inférieure ou égale à 0,05 et une permittivité relative inférieure ou égale à 1,2.

Cette exigence peut être éliminée lorsque le support de dispositif est en contact direct avec le DUT à une distance suffisante de l'antenne rayonnante. La justification de l'utilisation de tels matériaux doit être documentée dans le rapport d'essai;

- d) les réflexions dues à la structure du support de dispositif doivent être inférieures à –20 dB à l'emplacement du DUT;
- e) l'incertitude du support de dispositif doit être déterminée conformément au 8.5.5.

La conformité à ces exigences relatives au support de dispositif doit être documentée par le fabricant du système de mesure.

6.7 Grandeurs, procédures et exigences relatives au post-traitement

6.7.1 Formules de calcul de la sPD

6.7.1.1 Généralités

La sPD est évaluée à l'emplacement r en fonction du vecteur de Poynting complexe S . Selon la direction dominante de l'incidence et de la polarisation du champ électromagnétique, ou avec l'exposition dans le champ proche d'un DUT, les 6.7.1.2, 6.7.1.3 et 6.7.1.4 spécifient les formules pour le calcul de la sPD pour les différentes spécifications de la PD. Des justifications aux différentes spécifications de la PD sont données à l'Annexe I. Les fonctions de pondération des intégrantes de la Formule (7), de la Formule (8) et de la Formule (11) servent à éviter les contributions des régions où la densité de puissance est orientée vers l'extérieur par rapport à la surface d'évaluation, en réduisant l'intégrante dans ces régions à zéro, ou en raison d'inexactitudes numériques concernant les surfaces qui sont presque parallèles à la direction du vecteur de Poynting.

NOTE 1 La formule utilisée pour calculer la densité de puissance dépend des lignes directrices ou des réglementations nationales en matière d'exposition applicables.

NOTE 2 La direction de la densité de puissance par rapport à l'orientation de la surface d'évaluation n'a pas été étudiée dans l'IEC TR 63170:2018 [10]. Aux fins de compatibilité avec les résultats qui ont été mesurés conformément au [10], les fonctions de pondération de la Formule (8) et de la Formule (11) n'ont pas été appliquées.

6.7.1.2 Densité de puissance dans la direction de propagation de la normale à la surface vers la surface d'évaluation – sPD_{n+}

La densité de puissance dans la direction de propagation de la normale à la surface vers la surface d'évaluation, sPD_{n+} , doit être calculée conformément à la Formule (7).

$$sPD(r_0) = \frac{1}{\hat{A}(r_0)} \int_{\hat{A}(r_0)} \Re\{S(r)\} \cdot n_A(r) \cdot \Theta[\Re\{S(r)\} \cdot n_A(r)] d\hat{A}(r) \quad (7)$$

où:

- $\Re\{S(r)\}$ est la partie réelle du vecteur de Poynting complexe S à l'emplacement r ;
- $n_A(r)$ est le vecteur normal de la surface d'évaluation à l'emplacement r qui pointe vers la surface d'évaluation, avec $\|n_A(r)\| = 1$;
- $\Theta(x)$ est la fonction de Heaviside (échelon unité) de x ;
- $\hat{A}(r_0)$ est la surface d'évaluation à l'emplacement r ;
- r_0 est l'emplacement du point central.

NOTE 1 La densité de puissance de propagation de la normale à la surface vers la surface d'évaluation définie dans l'IEC TR 63170:2018 [10] correspond à sPD_{n+} , avec $\Theta(x) = 1$.

NOTE 2 La Formule (7) correspond à la densité de puissance traversant une surface A , i.e. c'est-à-dire l'énergie par unité de temps et par unité de surface traversant une surface d'aire A_{av} .

6.7.1.3 Densité de puissance de propagation totale vers la surface d'évaluation – sPD_{tot+}

La densité de puissance de propagation totale vers la surface d'évaluation, sPD_{tot+} , doit être calculée d'après la Formule (8) ainsi que la Formule (9) et la Formule (10).

$$sPD(r_0) = \frac{1}{\hat{A}(r_0)} \int_{A(r_0)} \|\Re\{S(r)\}\| \cdot \Xi\{\cos^{-1}[n_R(r) \cdot n_A(r)]\} d\hat{A}(r) \quad (8)$$

avec

$$n_R(r) = \Re\{S(r)\} / \|\Re\{S(r)\}\| \quad (9)$$

$$\Xi(\theta) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \theta < 85^\circ \\ 1 - (\theta - 85^\circ)/5^\circ, & 85^\circ \leq \theta < 90^\circ \\ 0, & \theta \geq 90^\circ \end{cases} \quad (10)$$

$\|\Re\{S(r)\}\|$ est l'amplitude de la partie réelle du vecteur de Poynting complexe S à l'emplacement r

et les autres termes sont spécifiés en 6.7.1.2.

NOTE 1 La densité de puissance de propagation totale vers la surface d'évaluation définie dans l'IEC TR 63170:2018 [10] correspond à sPD_{tot+} avec $\Xi(\theta) = 1$.

NOTE 2 La Formule (8) correspond à l'amplitude de la partie réelle du vecteur de Poynting sur une surface A , c'est-à-dire une surestimation des résultats au moyen de la Formule (7).

6.7.1.4 Densité de puissance totale vers la surface d'évaluation compte tenu des effets du champ proche réactif – sPD_{mod+}

La grandeur sPD_{mod+} se fonde sur la densité de puissance totale et tient également compte de la partie fictive du vecteur de Poynting afin d'expliquer le transfert d'énergie autre que de propagation dans le champ proche réactif. Elle doit être calculée d'après la Formule (11).

$$sPD(r_0) = \frac{1}{\hat{A}(r_0)} \int_{A(r_0)} \left[\left(\|\Re\{S(r)\}\| \cdot \Xi\{\cos^{-1}[n_R(r) \cdot n_A(r)]\} \right)^2 + \left(\|\Im\{S(r)\}\| \right)^2 \right]^{1/2} d\hat{A}(r) \quad (11)$$

$\|\Im\{S(r)\}\|$ est l'amplitude de la partie fictive du vecteur de Poynting complexe S à l'emplacement r

et les autres termes sont spécifiés en 6.7.1.3.

NOTE La Formule (11) correspond à l'amplitude du vecteur de Poynting (parties réelle et fictive) sur une surface A , c'est-à-dire une surestimation des résultats au moyen de la Formule (7) et de la Formule (8).

6.7.2 Procédure de post-traitement

Le post-traitement doit comprendre les étapes suivantes:

- détermination du vecteur de Poynting sur la surface d'évaluation (par exemple au moyen d'algorithmes de reconstruction de champ). Lorsque l'approximation de l'onde plane équivalente est valide (voir 7.4.2.1), la densité de puissance peut être calculée directement par mesurage de l'amplitude du champ E ou de l'amplitude du champ H à l'aide de l'impédance caractéristique du champ lointain η_0 ;
- détermination de la densité de puissance à partir du vecteur de Poynting d'après la Formule (7), la Formule (8) et la Formule (11). Par exemple, d'après la Formule (8), la densité de puissance est obtenue à partir du vecteur de Poynting à l'aide de la Formule (12):

$$S_{\text{tot}} = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ (E_y H_z^* - E_z H_y^*) \hat{x} + (E_z H_x^* - E_x H_z^*) \hat{y} + (E_x H_y^* - E_y H_x^*) \hat{z} \right\} \quad (12)$$

où:

$$\mathbf{E} = [\text{Re}(E_x) + j\text{Im}(E_x)] \hat{x} + [\text{Re}(E_y) + j\text{Im}(E_y)] \hat{y} + [\text{Re}(E_z) + j\text{Im}(E_z)] \hat{z}$$

$$\mathbf{H} = [\text{Re}(H_x) + j\text{Im}(H_x)] \hat{x} + [\text{Re}(H_y) + j\text{Im}(H_y)] \hat{y} + [\text{Re}(H_z) + j\text{Im}(H_z)] \hat{z}$$

La Formule (12) peut également être exprimée, comme cela est indiqué dans la Formule (13):

$$S_{\text{tot}} = \sqrt{S_x^2 + S_y^2 + S_z^2} \quad (13)$$

où:

$$S_x = \frac{1}{2} \text{Re}(E_y H_z^* - E_z H_y^*)$$

$$S_y = \frac{1}{2} \text{Re}(E_z H_x^* - E_x H_z^*)$$

$$S_z = \frac{1}{2} \text{Re}(E_x H_y^* - E_y H_x^*)$$

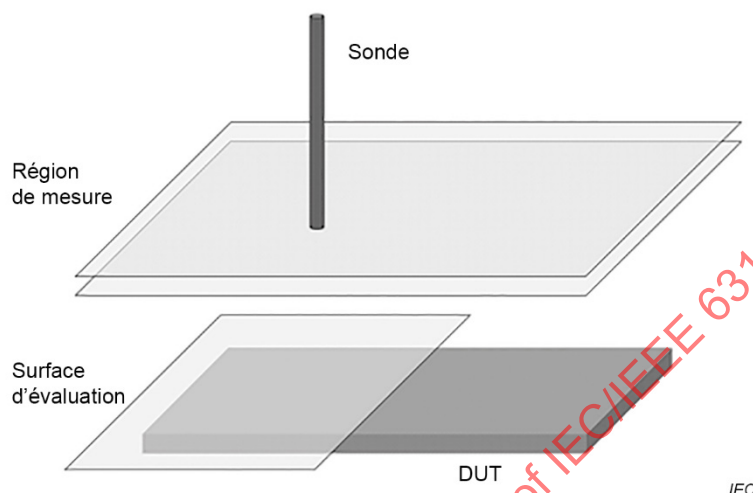
- moyennage spatial de la densité de puissance sur la zone de moyennage exigée afin de déterminer la sPD sur la surface d'évaluation; conformément au 8.4 de l'IEC/IEEE 63195-2:2021; La justification de l'utilisation d'une forme carrée ou d'une forme circulaire pour la zone de moyennage de la densité de puissance dans le cadre des évaluations de la conformité est donnée à l'Annexe D;

NOTE 1 Les réglementations nationales ou normes d'exposition applicables peuvent fournir une définition ou une interprétation différente de la densité de puissance.

- détermination de la $psPD$, la valeur de crête de la sPD , et de toute valeur de densité de puissance maximale secondaire moyennée dans l'espace (crêtes secondaires).

NOTE 2 La mesure des crêtes secondaires n'est pas exigée si la sPD est déterminée sur l'ensemble de la surface d'évaluation.

Des algorithmes de reconstruction de champ peuvent être utilisés pour transformer les champs mesurés dans la région de mesure en vecteur de Poynting sur la surface d'évaluation (Figure 2) avec une incertitude connue. Cela peut inclure des étapes intermédiaires telles que le calcul du champ H à partir du champ E (ou inversement) ou la récupération des composantes de champ et des densités de puissance à partir des données mesurées (par exemple de la phase à partir de l'amplitude). Voir Annexe E pour plus d'informations sur les méthodes de reconstruction de champ.



NOTE Les dimensions de la région de mesure et de la surface d'évaluation, ainsi que leurs orientations et leurs positions, sont simplifiées à des fins de représentation (voir 7.2.4 pour plus d'informations)

Figure 2 – Représentation simplifiée d'un montage de mesure générique impliquant l'utilisation d'algorithmes de reconstruction

6.7.3 Exigences

Les exigences suivantes s'appliquent au post-traitement:

- la densité de puissance sur l'ensemble de la surface d'évaluation doit être déterminée à partir des mesures du champ dans la région de mesure (par exemple par reconstruction de champ) avec une résolution suffisante pour s'assurer que l'incertitude de la $psPD$ correspond à la valeur indiquée par le fabricant du système;
- la densité de puissance doit être déterminée à partir du vecteur de Poynting (sauf si l'approximation de l'onde plane équivalente est valide);
- la densité de puissance doit être moyennée dans l'espace sur la zone de moyennage spécifiée (par exemple 1 cm^2 et/ou 4 cm^2) de la norme d'exposition ou des réglementations nationales applicables;
- les valeurs et emplacements de la $psPD$ et de toute crête secondaire doivent être enregistrés. A défaut, la distribution de la sPD doit être fournie;
- l'incertitude du postprocesseur doit être déterminée;
- les limites pour lesquelles l'incertitude est valide doivent être évaluées (par exemple en ce qui concerne la fréquence, la région de mesure, etc.);
- les méthodes de post-traitement doivent être documentées par le fabricant du système, y compris l'incertitude et les limites.

La conformité à ces exigences relatives au post-traitement doit être documentée par le fabricant du système de mesure.

7 Protocole d'évaluation de la densité de puissance

7.1 Généralités

Un logigramme général du processus d'évaluation de la densité de puissance est présenté à l'Article 5. A partir d'un plan d'évaluation et d'une approche de mesure, le processus converge vers l'évaluation complète de la densité de puissance et l'analyse de l'incertitude. La documentation et le rapport achèvent le processus d'évaluation.

NOTE Le présent document ne contient pas les informations nécessaires à la configuration des DUT pour des technologies sans fil spécifiques, notamment les réglages spécifiques tels que le mode de fonctionnement ou le débit de données permettant de s'assurer que la densité de puissance maximale est obtenue.

7.2 Préparation du mesurage

7.2.1 Vérification relative du système

Une vérification relative du système conforme aux procédures de l'Article A.3 doit être effectuée avant de procéder à l'évaluation de la densité de puissance d'un DUT. La vérification relative du système évalue la fonction de la sonde de champ, l'étalonnage de la sonde de champ, le système de balayage, l'instrumentation de mesure et le post-traitement. Les exigences applicables à la vérification relative du système sont les suivantes:

- a) si la vérification relative du système utilise une source qui ne possède pas de valeur cible absolue traçable, s'assurer qu'une vérification absolue du système a été effectuée conformément à l'Article A.4, ou qu'une valeur cible de vérification relative du système a été déterminée après la validation du système ou après la vérification absolue du système sur le site de l'utilisateur;
- b) la procédure de vérification relative du système doit être réalisée sur le même système de mesure de la densité de puissance que celui utilisé pour l'évaluation du DUT (voir 7.4);
- c) la vérification relative du système doit être effectuée de telle manière que tous les éléments du système de mesure soient valides pour le DUT à mesurer (par exemple, si la vérification est effectuée à une fréquence différente des bandes de fréquences d'essai du DUT, les paramètres d'étalonnage utilisés lors de la vérification doivent être valides pour les fréquences d'essai);
- d) la vérification relative du système doit satisfaire aux critères d'acceptabilité donnés en A.3.4.

NOTE 1 Etant donné qu'une vérification absolue du système satisfait à toutes les exigences, un essai de vérification absolue du système peut être effectué au lieu d'une vérification relative du système.

NOTE 2 Dans le cas où le système repose sur un modèle de capteur à fréquence continue valide dans l'ensemble de la plage de fréquences, effectuer la vérification du système à la fréquence la plus proche des antennes de vérification spécifiées à l'Annexe B est suffisant. Dans le cas où le système repose sur un étalonnage restrictif de la fréquence, la vérification est effectuée dans les limites de la fréquence médiane de la bande du DUT mesurée $\pm 15\%$.

7.2.2 Exigences relatives au DUT

Les exigences relatives au DUT sont les suivantes:

- a) l'antenne ou les antennes, la batterie et les accessoires doivent être ceux spécifiés dans le manuel utilisateur. Si ces informations ne sont pas disponibles dans le manuel utilisateur, il convient que le DUT soit équivalent aux échantillons de la ligne de production destinés à être vendus sur le marché. Les accessoires dont l'utilisation avec le DUT a été approuvée par le fabricant du dispositif doivent également être examinés (tels que les accessoires disponibles sur le site Web du fabricant dont l'utilisation avec le DUT a été approuvée). Ils doivent être documentés dans le rapport de mesure;
- b) toutes les antennes ainsi que leur emplacement et leur taille, y compris les réseaux et sous-réseaux, doivent être identifiées;
- c) la batterie doit être complètement chargée avant chaque mesure et aucun raccord ou câble externe qui a une incidence sur le résultat ne doit être utilisé;

Un niveau de batterie plus faible, non inférieur à 60 %, est admis, à condition qu'il soit démontré que le niveau de puissance n'a pas chuté davantage que l'incertitude relative à la dérive du DUT;

- d) lorsque les agences de réglementations nationales autorisent la réalisation d'essais sur des prototypes, la vérification doit être effectuée par le fabricant du dispositif pour s'assurer que la version commerciale présente exactement les mêmes caractéristiques mécaniques, électriques et de fonctionnement que le prototype soumis à l'essai. Si cela ne peut être garanti, les essais doivent être répétés par échantillonnage des versions commerciales non modifiées des produits;
- e) les accessoires qui peuvent avoir une incidence sur la puissance de sortie radiofréquence ou la distribution du courant radioélectrique du DUT doivent être soumis à l'essai conformément aux conditions d'utilisation prévues;
- f) les émetteurs fonctionnant par exemple au-dessous de 6 GHz peuvent avoir une influence sur la densité de puissance des émetteurs en raison du couplage avec la sonde, etc., et ces influences doivent être prises en compte. Si le couplage qui provient d'autres émetteurs actifs ne peut pas être filtré (système de mesure sélectif en fréquence, par exemple), les autres émetteurs doivent être inactifs lors du mesurage.

7.2.3 Préparation du DUT

Les exigences suivantes s'appliquent lors de la préparation du DUT en vue des essais:

- a) la puissance de sortie radiofréquence et la fréquence (canal) doivent être contrôlées soit par une liaison sans fil, soit par un logiciel de mode d'essai (mode actif). A défaut, un générateur externe ou un synthétiseur et un amplificateur peuvent être utilisés pour remplacer l'émetteur (mode passif) à condition que les champs mesurés et l'évaluation de la densité de puissance du DUT ne soient pas impactés et que l'impact sur l'incertitude de l'évaluation de la densité de puissance soit correctement évalué et demeure acceptable. Les chaînes de puissance de tous les éléments de transmission du ou des réseaux d'antenne doivent être évaluées afin de déterminer avec précision la puissance d'entrée fournie à l'antenne;

NOTE 1 Des réglementations nationales relatives à l'utilisation d'un générateur externe ou d'un synthétiseur et d'un amplificateur à la place d'un émetteur peuvent être en vigueur.

NOTE 2 Dans la pratique, il peut être difficile d'utiliser des générateurs de signaux externes, etc., pour remplacer un DUT et d'avoir la même distribution de champ.

- b) Lorsque la formation de faisceau est prise en charge par le dispositif, le faisceau doit être fixe pendant la durée de l'évaluation de la densité de puissance, afin de favoriser des résultats constants;
- c) enregistrer la puissance de sortie maximale moyennée dans le temps du DUT pour chaque bande de fréquences et mode de fonctionnement soumis à l'essai. Si la mise à l'échelle de la puissance est obtenue en utilisant le traitement des appels (voir 7.4.3.2), enregistrer les puissances de sortie moyennées dans le temps de N_c canaux, comme cela est spécifié en 7.4.3.3, pour chaque bande de fréquences soumise à l'essai;

NOTE 2 La puissance maximale moyennée dans le temps du DUT peut être vérifiée, par exemple, par des mesures de la puissance conduite avec une batterie complètement chargée, le cas échéant, ou selon des mesures de la puissance rayonnée et d'autres paramètres de fonctionnement pour la prise en charge de la mise à l'échelle.

- d) en cas de mesurage de la transmission simultanée de signaux non corrélés ou de signaux corrélés de type 2 (voir 7.5), établir la puissance de sortie maximale pour chaque émetteur et chaque antenne, comme cela est décrit à l'étape a) afin de s'assurer que la puissance d'émission combinée de toutes les antennes est également au maximum;
- e) si le DUT est capable de contrôler sa puissance d'émission dans le temps afin de maintenir la densité de puissance moyennée dans le temps au-dessous de la limite applicable, la procédure de moyennage temporel indiquée dans l'IEC/IEEE 62209-1528:2020 peut être appliquée. Si la fréquence et la phase relative entre les éléments de transmission sont maintenues constantes, la mesure de l'amplitude du champ E, du champ H ou du vecteur de Poynting à un emplacement fixe est suffisante. Sinon, la densité de puissance doit être mesurée sur les surfaces d'évaluation. La ou les périodes de moyennage temporel

applicables sont spécifiées conformément aux lignes directrices internationales (ICNIRP [2], par exemple) ou aux réglementations nationales. La procédure d'essai de moyennage temporel indiquée dans l'IEC/IEEE 62209-1528:2020 ne s'applique qu'aux dispositifs qui possèdent une capacité indépendante du réseau de contrôle de la puissance d'émission sur des durées et des intervalles spécifiques;

NOTE 3 Certaines autorités de réglementation peuvent avoir des exigences différentes ou supplémentaires concernant les mesures de la densité de puissance des dispositifs qui prennent en charge le contrôle de la puissance et le moyennage temporel.

- f) indiquer si des capteurs de proximité sont utilisés pour réduire la puissance de sortie, ainsi que les positions et modes de fonctionnement du DUT lorsque l'activation d'un capteur de proximité s'applique; vérifier si l'activation ou la désactivation du capteur de proximité est impactée par le système de mesure. En cas d'impact sur le système du capteur de proximité, le capteur de proximité doit passer au mode d'activation ou de désactivation de manière forcée à l'aide d'un logiciel d'essai, selon le cas, ou, lorsque cela est possible, la mesure doit être réalisée à une distance de séparation à laquelle le système de proximité n'est pas impacté. Les procédures indiquées au 7.7 de l'IEC/IEEE 62209-1528:2020 peuvent être utilisées pour déterminer les distances de déclenchement du capteur de proximité. Si le capteur de proximité effectue ou déclenche le moyennage temporel, la procédure relative au capteur de proximité indiquée dans l'IEC/IEEE 62209-1528:2020 peut être appliquée alors que le moyennage temporel est désactivé.

7.2.4 Choix des surfaces d'évaluation

7.2.4.1 Généralités

Le fabricant du dispositif doit indiquer toutes les positions du dispositif applicables au DUT (dans un manuel utilisateur, par exemple). Des exigences réglementaires nationales s'appliquent également. Les emplacements et orientations des surfaces d'évaluation doivent être déterminés en fonction des positions et de l'usage spécifiés du dispositif.

La forme de la surface d'évaluation dépend de la région du corps exposée. Le 7.2.4.2 spécifie la surface d'évaluation plane à utiliser pour évaluer l'exposition du torse ou d'autres régions localement planes du corps. Le 7.2.4.3 spécifie la surface SAM pour les évaluations de la densité de puissance lorsque le dispositif est évalué en mode voix à l'oreille. Si la surface SAM pour la densité de puissance ou les surfaces d'évaluation planes ne sont pas applicables, les surfaces d'évaluation spécifiques à utiliser sont indiquées en 7.2.4.5.

La projection des champs mesurés sur une surface d'évaluation non plane doit être effectuée en appliquant la procédure indiquée au 8.3 de l'IEC/IEEE 63195-2:2021. Cela implique la construction de surfaces autour de chaque point central. La surface comporte une zone qui correspond à l'intersection entre la surface d'évaluation et une sphère de rayon $r_T = \sqrt{A/\pi}$. Des algorithmes de triangulation sont utilisés pour diviser la surface d'évaluation non plane en un ensemble de triangles, puis la procédure par étapes indiquée au 8.3 de l'IEC/IEEE 63195-2:2021 est appliquée.

7.2.4.2 Surfaces d'évaluation pour les dispositifs portés sur le corps

La surface d'évaluation est plane pour l'exposition du torse ou d'autres régions localement planes du corps. La forme et l'étendue de la surface d'évaluation correspondent à la surface interne des fantômes virtuels plats, y compris le fantôme elliptique plat décrit dans l'IEC/IEEE 62209-1528:2020.

La distance d'évaluation (distance entre le DUT et la surface d'évaluation) correspond à la distance de séparation (distance entre le DUT et la surface externe du fantôme virtuel) plus les 2 mm d'épaisseur de l'enveloppe. Cela permet d'évaluer le rapport d'exposition totale (TER) sur les mêmes surfaces, comme cela est décrit en 7.5.

NOTE Le contact se fait à 2 mm de la surface du dispositif. Toutefois, certains régulateurs peuvent également spécifier directement la distance d'évaluation en y incluant l'enveloppe, c'est-à-dire les 2 mm. Il est nécessaire de le préciser avant de réaliser des essais.

Lors des mesures de l'exposition relative aux dispositifs portés sur le corps, la distance de séparation doit être fixée selon les trois options hiérarchiques suivantes.

a) Exigences réglementaires

S'il existe une exigence réglementaire régionale, territoriale ou nationale qui spécifie la distance de séparation du DUT, le DUT doit être positionné conformément à cette exigence.

b) "Distance d'utilisation prévue" spécifiée par le fabricant

S'il n'y a pas d'exigence réglementaire, la condition d'utilisation ou la distance de séparation prévue spécifiée par le fabricant doit être utilisée. Ces informations doivent être obtenues dans la documentation utilisateur fournie avec le DUT.

c) Distance de séparation par défaut

Si aucune des options précédentes n'est applicable, le DUT doit être mesuré avec chaque face accessible à une distance de séparation de 0 mm.

7.2.4.3 Surfaces d'évaluation pour les dispositifs tenus à l'oreille

Si le dispositif est destiné à être tenu à l'oreille lors d'appels vocaux (en mode voix et notamment en mode VoIP, par exemple), quatre surfaces d'évaluation qui correspondent aux positions de la joue et de l'inclinaison du côté gauche et du côté droit de la tête spécifiées dans l'IEC/IEEE 62209-1528:2020 doivent être soumises à l'essai.

La base des surfaces d'évaluation virtuelles est la surface interne du fantôme SAM décrit dans l'IEC/IEEE 62209-1528:2020. Les paramètres géométriques du fantôme SAM sont fondés sur les données anthropométriques de Gordon et al. [11]. La justification de la forme du fantôme SAM pour le DAS est donnée dans l'IEC/IEEE 62209-1528:2020.

La seule modification apportée au fantôme SAM pour l'évaluation de la densité de puissance concerne le pavillon (c'est-à-dire qu'au niveau du pavillon, la surface interne du fantôme SAM est modifiée par rapport à celle décrite dans l'IEC/IEEE 62209-1528:2020). La surface interne se trouve à 2 mm de la surface externe du fantôme SAM, en tout point. La Figure 3 et la Figure 4 représentent la surface de la tête du fantôme SAM pour les évaluations du DAS et la surface du fantôme SAM pour les évaluations de la densité de puissance, respectivement.

Les positions de l'inclinaison peuvent être exclues s'il peut être démontré, pour toute configuration de phase et d'amplitude, que les expositions dans les positions de l'inclinaison sont susceptibles d'être inférieures de plus de 3 dB à l'exposition dans les positions correspondantes de la joue. Des informations complémentaires doivent être fournies dans le rapport d'essai (c'est-à-dire selon l'emplacement du réseau d'antenne sur le DUT).

NOTE 1 L'exposition du pavillon est directement évaluée dans le présent document puisque les lignes directrices applicables ne font pas la distinction entre le corps et les extrémités au-dessus de 6 GHz.

NOTE 2 L'IEC/IEEE 62209-1528:2020 contient des informations supplémentaires concernant les approches statistiques visant à éliminer la position de l'inclinaison pour le DAS.

NOTE 3 Les travaux de recherche concernant la prudence de ce choix de surface d'évaluation pour la densité de puissance seront étudiés pour un amendement ultérieur du présent document.

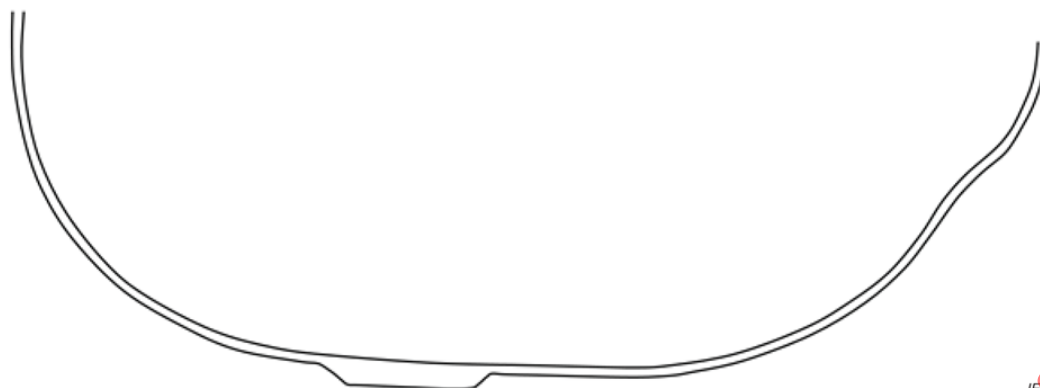


Figure 3 – Vue transversale du fantôme SAM pour les évaluations du DAS au niveau du plan de référence, comme cela est décrit dans l'IEC/IEEE 62209-1528:2020



Figure 4 – Vue transversale du fantôme SAM virtuel pour les évaluations de la densité de puissance au niveau du plan de référence (l'épaisseur de l'enveloppe est de 2 mm en tout point, y compris au niveau du pavillon)

7.2.4.4 Surfaces d'évaluation lorsque le dispositif est tenu à d'autres endroits de la tête

Si l'usage prévu se situe à d'autres endroits de la tête, par exemple devant le visage ou sur la tête, la position du DUT et la surface d'évaluation doivent être décrites dans le rapport d'essai. La position de la surface d'évaluation doit toujours être choisie de manière à obtenir une évaluation prudente par rapport à la distance entre le DUT et la tête de l'utilisateur.

Une alternative simple consiste à utiliser la surface d'évaluation des dispositifs portés sur le corps (7.2.4.2) pour le ou les côtés du DUT destinés à être tenus au niveau de la tête, en utilisant la distance d'évaluation par défaut (7.2.4.2 c)).

NOTE Les travaux de recherche concernant la prudence de ce choix de surface d'évaluation seront étudiés pour un amendement ultérieur du présent document.

7.2.4.5 Surfaces d'évaluation spécifiques

Des surfaces d'évaluation spécifiques aux dispositifs autres que ceux indiqués en 7.2.4.2 et 7.2.4.3 doivent être utilisées si la surface plane ou la surface SAM ne permet pas une estimation prudente de l'exposition et si le dispositif est destiné à fonctionner sur d'autres parties du corps que la tête ou le torse.

L'exposition des mains ou des membres doit être étudiée dans le cas des dispositifs tenus dans la main ou portés sur un membre (téléphones mobiles ou petites phablettes portatives, par

exemple) à des distances de séparation appropriées. En attendant qu'une surface représentative soit élaborée et présentée dans ce document, la surface d'évaluation pour les dispositifs portés sur le corps peut être étudiée à cette fin.

NOTE Dans la plupart des cas, une distance de séparation appropriée pour les mains ou les membres est présente au niveau de la position de contact. Lorsqu'une distance de séparation différente est utilisée, une justification est donnée dans le rapport d'essai ainsi qu'aux régulateurs afin d'appuyer la demande.

Des exemples de surfaces d'évaluation spécifiques au dispositif (c'est-à-dire des surfaces internes de fantômes spécifiques) sont décrits dans l'IEC/IEEE 62209-1528:2020. La justification de l'utilisation de surfaces d'évaluation spécifiques doit être documentée dans le rapport d'essai. D'autres procédures de positionnement du dispositif peuvent également être exigées.

7.2.4.6 Système de coordonnées pour le positionnement du DUT

Des systèmes de coordonnées pour les points de référence acoustiques ainsi que les lignes médianes verticales et horizontales du DUT (voir Figure 6) facilitent le positionnement et l'orientation précis de la surface d'évaluation sur le fantôme virtuel. Les points et axes de référence sur le DUT doivent être spécifiés selon la forme et la taille du DUT. Le système de balayage doit mettre ces points en corrélation de sorte que les surfaces d'évaluation du fantôme puissent être correctement alignées sur le DUT.

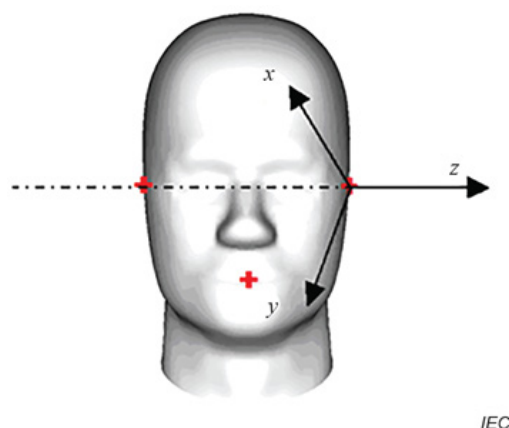
Le décalage et la rotation entre ces systèmes de coordonnées de référence peuvent être utilisés pour fournir une description univoque de la position du dispositif par rapport à la surface d'évaluation. Une définition du système de coordonnées pour le point de référence de l'oreille (ERP) gauche est représentée à la Figure 5.

Les axes x , y et z doivent former un système de coordonnées à droite. Pour l'ERP gauche, les axes sont spécifiés comme suit.

- L'axe z est spécifié par une ligne de connexion entre les ERP gauche et droit, et pointe de la droite vers la gauche du point de vue du fantôme virtuel. L'origine $z = 0$ se trouve au niveau de l'ERP gauche.
- L'axe y se situe dans le plan de référence le long de la ligne de l'arrière à la bouche (B-M) et est perpendiculaire à l'axe z .
- L'axe x est perpendiculaire au plan de référence le long de la ligne du cou au front (N-F) et coupe le plan de référence au point de référence de l'oreille gauche.

Pour l'ERP droit, le système de coordonnées de référence peut être spécifié de façon analogue. Les points et axes de référence d'un DUT sont définis dans la Figure 6.

Pour le fantôme plan, l'axe x et l'axe y sont parallèles à l'enveloppe du fantôme plan virtuel et l'axe z est perpendiculaire à celle-ci.

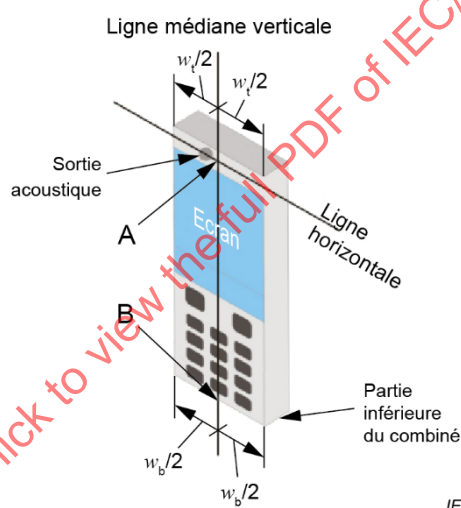


IEC

Légende

x, y, z axes du système de coordonnées par rapport au fantôme SAM virtuel

Figure 5 – Exemple de système de coordonnées de référence pour l'ERP gauche du fantôme SAM



IEC

Légende

w_t largeur du combiné au niveau de la sortie acoustique

w_b largeur de la partie inférieure du combiné

A point médian de la largeur w_t du combiné au niveau de la sortie acoustique

B point médian de la largeur w_b de la partie inférieure du combiné

Figure 6 – Exemple de points de référence et de lignes verticales et horizontales sur un DUT

7.3 Essais à réaliser

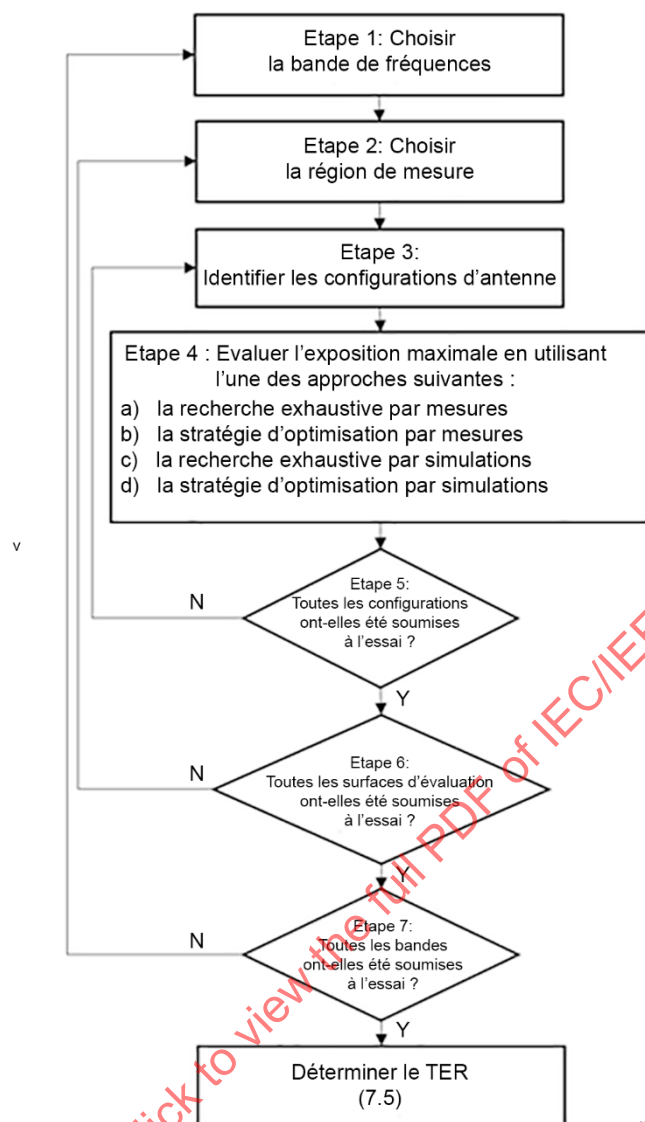
7.3.1 Généralités

L'exposition totale relative au DUT est déterminée à partir des évaluations de la densité de puissance et de la combinaison d'expositions en suivant les étapes ci-après (voir également Figure 7).

- 1) Choisir une bande de fréquences du DUT (voir 7.2.3).

- 2) Choisir une région de mesure pour la bande de fréquences de l'étape 1) afin de déterminer la densité de puissance sur la ou les surfaces d'évaluation en fonction des positions spécifiées du DUT (voir 7.2.4).
- 3) Identifier toutes les configurations d'antenne du DUT pour la région de mesure de l'étape 2). Pour les signaux corrélés de type 1 (voir 7.5) qui incluent toutes les combinaisons de phase et d'amplitude applicables d'un réseau ou sous-réseau. Lorsqu'une liste de codage définissant les combinaisons d'amplitude et de phase est connue, appliquer cette liste.
- 4) Evaluer les cas d'exposition maximale parmi les configurations d'antenne identifiées à l'étape 3). L'une des approches suivantes peut être utilisée (voir également les techniques d'évaluation de l'exposition maximale à l'Annexe C de l'IEC/IEEE 63195-2:2021, qui doivent également être validées et documentées en suivant la procédure indiquée à l'Annexe H de l'IEC/IEEE 63195-2:2021).
 - a) Recherche exhaustive par mesures: si le nombre de configurations d'antenne peut être appliqué dans la pratique, mesurer toutes les configurations d'antenne. Pour chaque mesure, appliquer la procédure du 7.4. Choisir la configuration présentant la $psPD$ la plus élevée.
 - b) Stratégie d'optimisation par mesures: utiliser une stratégie d'optimisation fondée sur les mesures d'un sous-ensemble suffisant de configurations d'antenne permettant d'évaluer toutes les configurations (voir 7.3.3). Pour chaque mesure, appliquer la procédure du 7.4. La stratégie d'optimisation doit déterminer une limite supérieure pour la $psPD$ et l'erreur maximale (par exemple, voir Reboux et al. [12], Teniou et al. [13]).
 - c) Recherche exhaustive par simulations: effectuer des simulations numériques pour toutes les configurations d'antenne identifiées à l'étape 3) afin de déterminer la configuration d'essai présentant la $psPD$ la plus élevée. Voir 7.3.2 pour plus d'informations sur l'approche par simulations et la validation du modèle par rapport aux mesures. La $psPD$ de la configuration d'essai présentant la $psPD$ la plus élevée et celle des autres configurations décrites en 7.3.2 doivent être mesurées.
 - d) Stratégie d'optimisation par simulations: utiliser une stratégie d'optimisation fondée sur les simulations numériques de toutes les antennes indépendantes afin de déterminer la configuration d'essai présentant la $psPD$ la plus élevée. Voir 7.3.2 pour plus d'informations sur l'approche par simulations et la validation du modèle par rapport aux mesures. La $psPD$ de la configuration d'essai présentant la $psPD$ la plus élevée et celle des autres configurations décrites en 7.3.2 doivent être mesurées.

Pour la configuration présentant la $psPD$ la plus élevée, enregistrer la $psPD$ ainsi que la distribution de la sPD ou toute crête secondaire.
- 5) Revenir à l'étape 3) jusqu'à ce que toutes les configurations d'antenne (par exemple, les sous-réseaux) aient été soumises à l'essai.
- 6) Revenir à l'étape 2) jusqu'à ce que toutes les surfaces d'évaluation aient été soumises à l'essai.
- 7) Revenir à l'étape 1) jusqu'à ce que toutes les bandes de fréquences aient été évaluées.
- 8) Déterminer le rapport d'exposition totale (TER) comprenant la sommation des expositions de tout mode de transmission simultanée (voir 7.5).



IEC

Figure 7 – Logigramme de la procédure d'essai donnée en 7.3

7.3.2 Essais à réaliser en cas de prise en charge par simulations du réseau d'antenne

Une évaluation par modélisation numérique du DUT peut être utilisée pour déterminer les cas d'exposition maximale parmi un ensemble de combinaisons d'amplitude et de phase, comme cela est décrit dans l'IEC/IEEE 63195-2:2021.

Le modèle de DUT numérique doit être validé (conformément au 7.5 de l'IEC/IEEE 63195-2:2021) afin de s'assurer que la configuration numérique prévue donnant l'exposition maximale est effectivement prudente pour les émetteurs évalués. Cela implique que les configurations du réseau d'antenne ou sous-réseau d'antenne, y compris les informations d'amplitude et de phase, soient connues et contrôlables pour les mesures afin de valider le modèle de DUT numérique relatif.

La procédure comporte les étapes suivantes:

- a) dans la bande de fréquences donnée et la région de mesure déterminée indiquée au 7.3.1, identifier la $psPD$ simulée la plus élevée, appelée $psPD_{sim,max}$, à partir de tous les résultats de $psPD$ simulée, appelés $psPD_{sim,i}$, où $i = 1$ à N combinaisons d'amplitude et de phase;

- b) dans la configuration d'essai maximale donnée, identifiée à l'étape a), mesurer la densité de puissance, appelée $psPD_{meas,max}$;
- c) mesurer la densité de puissance pour toutes les configurations d'essai satisfaisant à la condition de la Formule (14);

$$psPD_{sim,i} > psPD_{sim,max} \times \left(B_{sim} - \sqrt{B_{sim}^2 - 1} \right) \quad (14)$$

où:

$$B_{sim} = \frac{1}{1 - (1,64 U_{sim,rel})^2} \quad (15)$$

$U_{sim,rel}$ dans la Formule (15) est l'incertitude relative ($k = 1$) de l'outil de simulation, dans la bande de fréquences donnée et dans la région de mesure déterminée conformément au 7.3.1;

NOTE 1 L'incertitude relative $U_{sim,rel}$ est l'incertitude de la simulation, l'incertitude sur l'amplitude absolue étant réduite au niveau de l'incertitude sur l'amplitude relative pour les éléments d'antenne indépendants, tandis que l'incertitude sur la phase absolue est toujours prise en compte. Voir l'évaluation de l'incertitude des simulations dans l'Article 9 de l'IEC/IEEE 63195-2:2021.

NOTE 2 Par exemple, pour un outil de simulation dont l'incertitude relative ($k = 1$) est de 10 %, toutes les configurations d'antenne simulées supérieures à 80 % de la $psPD$ maximale mesurée sont répétées à l'aide de la densité de puissance intégrale.

- d) mesurer la densité de puissance pour toutes les configurations d'essai satisfaisant à la condition de la Formule (16), si ce n'est pas déjà fait:

$$psPD_{sim,scaled,i} > psPD_{limit} \times \left(B_{sim} - \sqrt{B_{sim}^2 - 1} \right) \quad (16)$$

où $psPD_{sim,scaled,i}$ est un résultat simulé mis à l'échelle par la valeur maximale du rapport $psPD_{meas,i} / psPD_{sim,i}$;

- e) vérifier que toutes les $psPD$ mesurées et simulées dans la même bande de fréquences, la même région de mesure et la même configuration d'antenne se situent dans les limites de l'incertitude composée ($k = 2$) de la simulation et du mesurage, donnée par la Formule (17);

$$E_n = \sqrt{\frac{(psPD_{sim,scaled,i} - psPD_{meas,i})^2}{(psPD_{sim,scaled,i} \times U_{sim(k=2)})^2 + (psPD_{meas,i} \times U_{sys(k=2)})^2}} \leq 1 \quad (17)$$

où:

E_n est l'erreur normalisée;

U_{sim} est l'incertitude élargie ($k = 2$) du code de simulation, dans la bande de fréquences donnée et dans la région de mesure déterminée au 7.3.1; Voir l'évaluation de l'incertitude des simulations dans l'Article 9 de l'IEC/IEEE 63195-2:2021;

U_{sys} incertitude élargie ($k = 2$) du système de mesure, dans la bande de fréquences donnée et dans la région de mesure déterminée au 7.3.1.

Il convient de combiner les erreurs au moyen de la RSS dans la transformation qui correspond le plus à une distribution Gaussienne. Etant donné que la plupart des erreurs sont distribuées selon une loi logarithmique normale, il convient de calculer l'incertitude composée sous forme de RSS en décibel (dB). Des exemples sont donnés dans la publication de Newell [14] et l'ETSI ETR 028 [15];

- f) si $E_n > 1$, la procédure de mesure du 7.3.3 doit être appliquée pour toutes les configurations où le résultat mesuré se situe dans l'incertitude relative du système de mesure par rapport à la limite.

7.3.3 Essais à réaliser par des mesures du réseau d'antenne

L'exposition à une densité de puissance prudente peut également être évaluée par des mesures, en utilisant uniquement des techniques de récupération de phase combinées à des techniques d'optimisation (Reboux et al. [12]).

Cette technique limite le nombre de mesures exigées au nombre de configurations indépendantes du réseau d'antenne ou du sous-réseau d'antenne. Si nécessaire, la configuration maximale déterminée peut être remesurée, ou la valeur maximale prudente peut être utilisée à des fins de conformité.

NOTE Le nombre suffisant de configurations indépendantes dépend de la technique d'optimisation utilisée; voir les techniques d'évaluation de l'exposition maximale à l'Annexe C de l'IEC/IEEE 63195-2:2021.

7.4 Procédure de mesure

7.4.1 Procédure de mesure générale

Le système de mesure doit satisfaire aux exigences de l'Article 6. La procédure de mesure générale est la suivante.

Il est recommandé d'appliquer cette procédure de mesure en utilisant le mode de fonctionnement et le canal ayant la puissance de sortie disponible maximale afin d'éviter la mise à l'échelle excessive à l'étape f) et de permettre un bon rapport signal sur bruit.

- a) Première référence: Mesurer le champ E ou le champ H local en un point situé dans la région de mesure et où le champ se trouve à 3 dB de la valeur maximale ou au moins 20 dB au-dessus du niveau de bruit. Ce niveau de référence est utilisé pour évaluer la dérive de sortie du DUT pendant le mesurage (voir 7.4.4).

NOTE 1 Si l'emplacement de la valeur maximale du champ ou un emplacement au moins 20 dB au-dessus du niveau de bruit n'est pas connu, un balayage préalable peut être utilisé pour trouver un tel emplacement. Aucune exigence relative à la taille, à la résolution ou au nombre de points du balayage préalable n'est nécessaire, dans la mesure où le balayage préalable n'est utilisé que pour trouver un point approprié pour les mesures de référence.

- b) Balayage du champ: Mesurer les champs dans la région de mesure, comme cela est décrit en 7.4.2. Différentes techniques de mesure s'appliquent en fonction du système de mesure et selon que la surface d'évaluation se situe dans le champ lointain. Le balayage doit satisfaire aux exigences du 6.5.

NOTE 2 Le balayage peut inclure une combinaison de méthodes afin de réduire le temps de mesure, à condition que cela n'augmente pas l'incertitude de mesure. Un exemple consiste à effectuer d'abord un balayage alors que la sonde se déplace continuellement sur la région de mesure, puis à mesurer des points discrets dans une sous-région où les champs se trouvent à au moins -17 dB de la limite d'exposition applicable.

- c) Vérification que la valeur de crête est relevée: Calculer la sPD sur la surface d'évaluation à partir des champs de l'étape b) et s'assurer que la $psPD$ est évaluée avec précision. La zone de moyennage A_{av} pour le calcul de la $psPD$ est spécifiée par les limites d'exposition ou les exigences réglementaires applicables. Deux vérifications sont effectuées.

La première vérification consiste à s'assurer qu'une région suffisamment grande a été mesurée et que la $psPD$ ne se situe pas sur la limite de la surface d'évaluation. L'étendue de la zone de balayage doit être telle que le niveau de troncature le plus élevé du champ E ou du champ H doit être inférieur à la spécification du fabricant pour satisfaire à l'incertitude de reconstruction spécifiée.

NOTE 3 La vérification que la $psPD$ ne se situe pas sur la limite s'applique uniquement si la surface d'évaluation est une sous-région du fantôme virtuel. Si la surface d'évaluation est le fantôme virtuel complet, l'expansion de la région de mesure ne modifie pas l'emplacement de la $psPD$.

La deuxième vérification consiste à s'assurer que la reconstruction de champ n'est pas impactée par la taille de la région de mesure et qu'il n'y a donc aucun impact sur la $psPD$. Cela peut être soumis à l'essai en vérifiant la convergence des deux résultats de $psPD$. Calculer une deuxième valeur de $psPD$ en utilisant un sous-ensemble de valeurs parmi les données mesurées existantes (par exemple, en retirant tous les résultats aux bords de la région de mesure). La différence entre ces deux valeurs de $psPD$ doit se situer dans les limites de l'incertitude correspondant à la troncature de la zone de mesure (TR , voir 8.4.15). Si la technique de reconstruction n'est pas utilisée, cette deuxième vérification peut être omise.

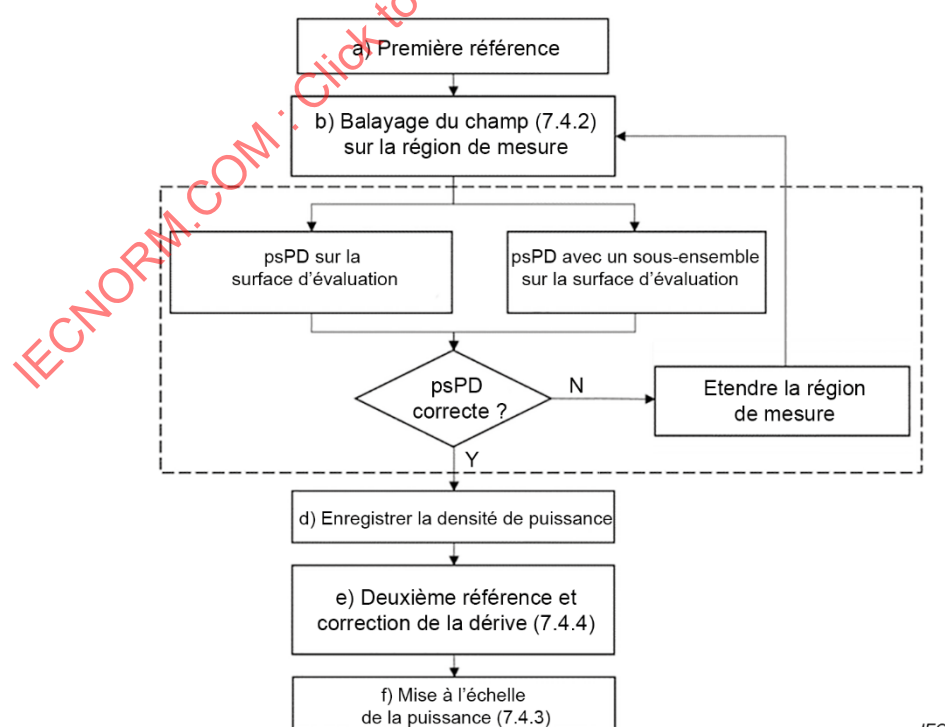
Si l'une ou l'autre de ces vérifications échoue, étendre la région de mesure et revenir à l'étape b).

Il est recommandé que ces deux vérifications soient automatisées par le fabricant du système d'essai, autrement une intervention manuelle est exigée.

NOTE 4 Les calculs de la sPD et la détermination de l'exactitude de la $psPD$ peuvent être effectués au cours du balayage de l'étape b), de manière à effectuer toute expansion de la région de mesure sans arrêter le balayage.

- d) Densité de puissance: Enregistrer les emplacements et les valeurs de la $psPD$ (évaluation d'émission unique) et de la sPD sur la surface d'évaluation (pour évaluer l'exposition avec plusieurs émetteurs).
- e) Deuxième référence: Mesurer le champ E ou le champ H local à l'emplacement choisi à l'étape a). La dérive du DUT est estimée comme la différence entre les amplitudes au carré des valeurs de champ relevées aux étapes a) et e), comme cela est décrit en 7.4.4.
- f) Mise à l'échelle de la puissance: Mettre à l'échelle la densité de puissance à la valeur la plus élevée parmi les modes de fonctionnement et canaux applicables à la bande de fréquences, comme cela est décrit en 7.4.3.

Les systèmes et techniques de mesure qui sont conformes au logigramme général (Figure 8) peuvent varier. Les descriptions de chaque étape sont données dans les paragraphes qui suivent, de même que les contraintes d'applicabilité pour chaque étape, les informations nécessaires à la mise en œuvre de la méthode et les lignes directrices générales indiquant comment caractériser l'incertitude de l'évaluation.



IEC

Figure 8 – Logigramme de la procédure de mesure générale donnée en 7.4.1

7.4.2 Méthodes d'évaluation de la densité de puissance

7.4.2.1 Régions de champ

Habituellement, la limite du champ lointain est obtenue en calculant $2D^2/\lambda$, avec la taille de l'antenne, D , et la longueur d'onde de fonctionnement, λ . Quand bien même, la définition de cette limite débouche sur des estimations très prudentes du champ lointain et entraîne par la suite des contraintes inutiles pour les mesures et les estimations de champ. Une équation de [16] fournit une estimation moins prudente et détermine la limite du champ lointain à l'aide de la Formule (18)

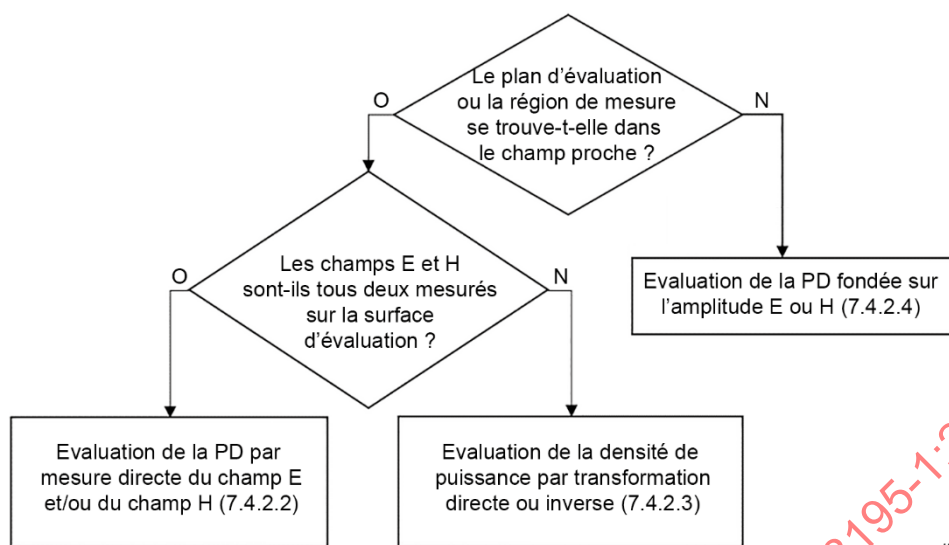
$$\lambda \times \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^{0,8633} \times \left[0,1673 \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^{0,8633} + 0,1632 \right] \quad (18)$$

Les valeurs choisies pour la limite du champ lointain sont indiquées dans le Tableau 2. Dans le champ lointain, il suffit seulement de mesurer l'amplitude du champ E ou du champ H et d'estimer la densité de puissance locale par le calcul $E^2/(377 \Omega)$ ou $H^2 \times (377 \Omega)$; autrement dit, si la région de mesure et la surface d'évaluation se trouvent dans le champ lointain, la procédure indiquée en 7.4.2.4 peut être utilisée. Des informations supplémentaires sont fournies à l'Annexe H.

NOTE La validité de l'estimation de la densité de puissance au moyen de la densité de puissance équivalente d'onde plane pour les distances supérieures ou égales à la limite du champ lointain [16] n'a été démontrée que pour le lobe principal (voir Annexe H). Il est nécessaire d'effectuer des évaluations supplémentaires pour les lobes latéraux.

A des distances inférieures à celles indiquées dans le Tableau 2, il est nécessaire de déterminer l'amplitude et la phase du champ E et du champ H pour évaluer la $psPD$. Le champ total (amplitude et phase) peut être mesuré directement ou par reconstruction de phase, ou en calculant un champ (par exemple, le champ H) à partir de l'amplitude et de la phase de l'autre champ. Dans ce cas, utiliser la procédure indiquée en 7.4.2.2 si les champs sont mesurés directement sur la surface d'évaluation qui se trouve dans le champ proche, ou utiliser la procédure indiquée en 7.4.2.3 si la reconstruction de champ est utilisée pour transformer les champs en surface d'évaluation. La Figure 9 est un logigramme des méthodes d'évaluation de la densité de puissance.

La distance entre tous les points de la région de mesure et le DUT doit être choisie de manière à éviter toute perturbation du champ par la ou les sondes. L'incertitude de diffusion de la sonde de champ est décrite en 8.4.7.



IEC

Figure 9 – Logigramme des méthodes d'évaluation de la densité de puissance données en 7.4.2

Tableau 2 – Distance d'évaluation minimale entre l'antenne du DUT et la surface d'évaluation pour laquelle l'approximation de l'onde plane équivalente s'applique

Dimension de l'antenne	Distance minimale
$D = \lambda/3$	$0,35\lambda$
$D = \lambda$	$1,6\lambda$
$D = 2,5\lambda$	$6,8\lambda$
$D = 5\lambda$	21λ
NOTE D est la dimension linéaire maximale de l'antenne fonctionnant dans la configuration choisie [16].	

7.4.2.2 Evaluation de la densité de puissance par mesure directe du champ E ou du champ H ou des deux

Si la densité de puissance est mesurée directement sur les surfaces d'évaluation, la procédure est la suivante:

- balayer un champ (E ou H , ou bien E et H) sur la surface d'évaluation. L'amplitude ou l'amplitude et la phase des champs E et H doivent être évaluées et la densité de puissance calculée conformément au 7.4.1;
- la résolution spatiale de la mesure et la zone de balayage dépendent de la caractéristique du champ mesuré et de la méthodologie de mesure utilisée par le système. Dans le champ proche, une taille de pas égale à $\lambda/4$ ou moins est exigée. Dans le champ lointain, cette exigence peut être assouplie, par exemple $\lambda/2$ ou moins.

7.4.2.3 Evaluation de la densité de puissance par transformation directe ou inverse

Si la densité de puissance sur les surfaces d'évaluation est déterminée par transformation directe ou par transformation inverse des champs, la procédure est la suivante:

- balayer le champ E ou le champ H (amplitude ou amplitude et phase) sur la région de mesure;

- b) la résolution spatiale de la mesure et la zone de balayage dépendent de la caractéristique du champ mesuré et de la méthodologie de mesure utilisée par le système. En général, si une transformation directe ou inverse est appliquée, il convient que la zone de balayage soit suffisamment grande pour satisfaire aux exigences du 7.4.1 c). Les exigences doivent être spécifiées, validées et documentées par le fabricant;

NOTE 1 Les dispositifs de balayage de type planaire exigent habituellement une taille de pas inférieure à $\lambda/2$. Lorsque les mesures sont obtenues dans des régions où les modes évanescents ne sont pas négligeables, une résolution spatiale inférieure peut être exigée (Carrasco et al. [17]). Des critères similaires s'appliquent également aux systèmes de balayage cylindriques pour lesquels la résolution spatiale dans la direction verticale peut être inférieure à $\lambda/2$. Dans la direction azimutale, la taille de pas angulaire $\Delta\phi$ peut être inférieure à $\lambda/(2\rho_{\text{meas}})$ en radians, où ρ_{meas} désigne la distance radiale aux emplacements de mesure. Pour les systèmes sphériques, les tailles de pas angulaires maximales dans l'élévation et l'azimut peuvent être spécifiées de façon analogue comme $\Delta\theta = \Delta\phi = \lambda/(2R_{\text{meas}})$, où R_{meas} désigne la distance radiale aux emplacements de mesure. L'incertitude de positionnement des capteurs de sonde de champ aux points de mesure peut être analysée et documentée.

- c) calculer un autre champ à partir du champ mesuré à l'aide d'un algorithme de reconstruction. Etant donné que la densité de puissance exige de connaître à la fois l'amplitude et la phase, des algorithmes de reconstruction peuvent être utilisés pour obtenir les composantes de champ et les densités de puissance à partir des données mesurées (par exemple pour obtenir la phase à partir de l'amplitude si seule cette dernière est mesurée);
- d) procéder à une transformation directe ou inverse des champs en surface d'évaluation (voir Annexe E).

NOTE 2 En ce qui concerne la transformation inverse, les mesures trop éloignées de la surface d'évaluation peuvent ne pas retenir les champs proches réactifs qui contribuent également à la densité de puissance.

7.4.2.4 Evaluation de la densité de puissance à partir de l'évaluation de l'amplitude du champ E ou du champ H uniquement

Si la surface d'évaluation et la région de mesure se trouvent toutes deux dans le champ lointain du DUT (voir Tableau 2), seule l'amplitude des champs électriques ou des champs magnétiques nécessite d'être mesurée pour déterminer la distribution de la densité de puissance. Mesurer l'amplitude du champ électrique ou du champ magnétique sur la région de mesure. Il convient de caractériser et de documenter l'incertitude de mesure due à la résolution d'échantillonnage.

7.4.3 Mise à l'échelle de la puissance selon le mode de fonctionnement et le canal

7.4.3.1 Généralités

Deux méthodes permettant de mettre à l'échelle la densité de puissance à la valeur la plus élevée parmi plusieurs modes de fonctionnement sont décrites. La première méthode consiste à mesurer tous les canaux et modes de fonctionnement dans une plage de fréquences, ce qui permet de déterminer le canal et le mode de fonctionnement présentant la plus haute exposition. Il s'agit d'une méthode rapide si des méthodes sans fil et automatisées sont disponibles pour le traitement des appels. Sinon, la deuxième méthode peut être utilisée. Cette méthode n'exige pas la prise en charge de modes d'essai ni la synchronisation avec l'équipement de mesure, mais elle exige de connaître la puissance de sortie maximale moyennée dans le temps pour un certain nombre de canaux (voir 7.4.3.3) dans la bande soumise à l'essai.

Cette procédure peut également être utilisée pour trouver les combinaisons de mode de fonctionnement et de canal qui donnent la $psPD$ la plus élevée et à utiliser à l'étape 1) du 7.3.1. Dans ce cas, l'emplacement r de l'étape a) du 7.4.3.2 doit être choisi de manière à être dans l'axe de visée physique de l'antenne, sans qu'aucune commande d'orientation de faisceau ne soit appliquée. Les étapes a) à e) du 7.4.3.2 doivent être exécutées pour trouver la combinaison maximale de mode de fonctionnement et de canal à utiliser pour les étapes restantes du 7.3.1. Pour 7.4.3.2, l'emplacement r de l'étape a) doit être choisi de la même manière, mais les étapes a) à f) doivent être exécutées.

7.4.3.2 Mise à l'échelle de la puissance par traitement automatique des appels

Lorsque le traitement automatique des appels (choix de canal et transferts de modes de fonctionnement) est disponible, la procédure suivante peut être utilisée pour mettre à l'échelle la $psPD$ évaluée.

- a) Identifier l'emplacement r de la $psPD$ évaluée en 7.4.1, appelée $psPD_{\text{evaluated}}$. Le champ E à cet emplacement et dans cette configuration est appelé $E_{\text{evaluated}}$.
- b) Sélectionner tous les modes de fonctionnement pour lesquels toutes les affirmations suivantes sont vraies:
 - 1) la bande de fréquences chevauche la bande de fréquences de $psPD_{\text{evaluated}}$;
 - 2) le même étage amplificateur RF est utilisé;
 - 3) la même antenne, antenne en réseau ou antenne en sous-réseau est utilisée;
 - 4) l'étalonnage de la sonde de champ est valide;
 - 5) la puissance de sortie du canal au centre de la bande de fréquences est au moins égale à la moitié de la puissance de sortie de la condition d'essai identifiée à l'étape a).
- c) Sélectionner tous les canaux pour chaque mode de fonctionnement de l'étape b).
- d) Mesurer le champ E à l'emplacement r identifié à l'étape a) pour chaque mode de fonctionnement de l'étape b) et chaque canal de l'étape c).
- e) Trouver la configuration (mode de fonctionnement et canal) qui donne le champ E mesuré le plus élevé à l'étape d), appelé E_1 .
- f) Mesurer la puissance de sortie moyennée dans le temps du DUT pour la configuration de l'étape e), appelée $P_{1,\text{tested}}$, et la puissance de sortie maximale moyennée dans le temps du DUT pour la même configuration, incluant les tolérances de production, appelée $P_{1,\text{max}}$.
- g) Mettre à l'échelle la $psPD$ évaluée en 7.4.1 ($psPD_{\text{evaluated}}$) à la valeur maximale ($psPD_{\text{max}}$) à l'aide de la Formule (19).

$$psPD_{\text{max}} = psPD_{\text{evaluated}} \times \left(\frac{|E_1|^2}{|E_{\text{evaluated}}|^2} \times \frac{P_{1,\text{max}}}{P_{1,\text{tested}}} \right) \quad (19)$$

où:

$P_{1,\text{max}}$ est la puissance de sortie maximale moyennée dans le temps du DUT pour tous les modes de fonctionnement de la bande de fréquences soumise à l'essai;

$P_{1,\text{tested}}$ est la puissance de sortie moyennée dans le temps du DUT pour la configuration de l'étape e).

NOTE 1 Si le champ H ou la densité de puissance directe est utilisée comme indicateur de mesure, le champ E de la Formule (17) peut être remplacé par le champ H ou la densité de puissance.

NOTE 2 Si la combinaison d'expositions est appliquée (voir 7.5), la distribution de la sPD peut être mise à l'échelle par le même rapport.

7.4.3.3 Mise à l'échelle de la puissance par mesures supplémentaires

La procédure suivante peut être utilisée pour mettre à l'échelle la $psPD$ évaluée pour tous les modes de fonctionnement d'une bande de fréquences soumise à l'essai.

- a) Identifier l'emplacement r de la $psPD$ évaluée en 7.4.1, appelée $psPD_{\text{evaluated}}$. Le champ E à cet emplacement et dans cette configuration est appelé $E_{\text{evaluated}}$.

- b) Sélectionner d'autres canaux d'essai dans la bande de fréquences soumise à l'essai. Si la largeur de la bande de fréquences d'émission ($\Delta f = f_{\text{high}} - f_{\text{low}}$) dépasse 1 % de la fréquence médiane f_c , le nombre de canaux N_c à soumettre à l'essai parmi le nombre total de canaux N dans la bande doit être conforme à la Formule (20):

$$N_c = \min \left\{ N, 2 \times \text{roundup} \left[\frac{10 \times (f_{\text{high}} - f_{\text{low}})}{f_c} \right] + 1 \right\} \quad (20)$$

Si $N_c > 1$, les canaux soumis à l'essai doivent être équidistants en fréquence (autant que possible) et doivent comprendre les canaux aux fréquences les plus basses et les plus hautes.

NOTE 1 Les agences de réglementations peuvent avoir des exigences différentes en ce qui concerne le nombre de canaux à soumettre à l'essai par bande de transmission, en fonction des attributions de fréquences et d'autres exigences en matière de technologie sans fil.

- c) Mesurer le champ E à l'emplacement r identifié à l'étape a) pour chaque canal de l'étape b). La mesure doit être effectuée pour tout mode de fonctionnement qui remplit les critères suivants:
- 1) la bande de fréquences chevauche la bande de fréquences du mode de fonctionnement de l'étape a);
 - 2) le même étage amplificateur RF est utilisé;
 - 3) la même antenne, antenne en réseau ou antenne en sous-réseau est utilisée;
 - 4) l'étalonnage de la sonde de champ est valide;
 - 5) la puissance de sortie du canal le plus proche du centre de la bande de fréquences est au moins égale à la moitié de la puissance de sortie de la condition d'essai identifiée à l'étape a).
- d) Trouver le canal fournissant le champ E mesuré le plus élevé, appelé E_1 .
- e) Mettre à l'échelle la $psPD$ évaluée en 7.4.1 ($psPD_{\text{evaluated}}$) à la valeur maximale ($psPD_{\text{max}}$) à l'aide de la Formule (21).

$$psPD_{\text{max}} = psPD_{\text{evaluated}} \times \left(\frac{|E_1|^2}{|E_{\text{evaluated}}|^2} \times \frac{P_{1,\text{max}}}{P_{1,\text{tested}}} \right) \quad (21)$$

où:

$P_{1,\text{max}}$ est la puissance de sortie maximale moyennée dans le temps du DUT pour tous les modes de fonctionnement de la bande de fréquences soumise à l'essai;

$P_{1,\text{tested}}$ est la puissance de sortie moyennée dans le temps du DUT pour la configuration de l'étape d).

NOTE 2 Si le champ H ou la densité de puissance directe est utilisé comme indicateur de mesure, le champ E de la Formule (21) peut être remplacé par le champ H ou la densité de puissance.

NOTE 3 Si la combinaison d'expositions est appliquée (voir 7.5), la distribution de la sPD peut être mise à l'échelle par le même rapport.

7.4.4 Correction de la dérive du DUT

La dérive du DUT lors de la mesure de la densité de puissance est calculée comme la différence relative entre la première mesure de référence et l'une des mesures de référence suivantes (i de n), respectivement Ref_1 et Ref_i , selon la Formule (22).

$$drift = 100 \% \times \frac{Ref_i - Ref_1}{Ref_1} \quad (22)$$

L'une des méthodes de mesure suivantes doit être utilisée pour déterminer les valeurs de référence.

- a) Procéder à des mesures de champ en un point unique à l'aide du système de mesure de la densité de puissance (voir étapes a) et e) en 7.4.3.2). Chaque mesure de référence est effectuée au même emplacement de la sonde. La référence est le carré du champ.
- b) Si la méthode donnée en a) n'est pas assez sensible, une méthode alternative consiste à mesurer la puissance rayonnée du DUT. La référence est la puissance du champ lointain à l'angle du gain maximal de l'antenne. Cet angle doit être déterminé à l'avance et est le même pour chaque mesure de référence Ref_1 et Ref_2 . La référence est la puissance rayonnée.
- c) Si la méthode donnée en a) n'est pas suffisamment sensible, une alternative consiste à effectuer des mesures de puissance conduite sur le dispositif au niveau de l'accès d'antenne à l'aide d'un mesureur de puissance étalonné. La référence est la puissance conduite.
- d) Les mesures de Ref_1 et Ref_i sont réalisées immédiatement avant, pendant et après la mesure de la densité de puissance (n), respectivement. Si elles ne peuvent pas être réalisées avec précision pendant le processus de mesure de la densité de puissance (par exemple en raison du temps nécessaire à la modification du montage de mesure), Ref_1 et Ref_n peuvent être mesurées indépendamment du processus de mesure de la densité de puissance, à condition que l'intervalle de temps entre les deux mesures soit au moins égal au temps de mesure de la densité de puissance prévu le plus long.
- e) Lorsque la dérive totale du DUT est de 5 % ou moins, elle doit soit être incluse dans le bilan d'incertitudes, soit être traitée comme un décalage systématique.
- f) Toute dérive du DUT supérieure à 5 % doit être considérée comme un décalage systématique, et la mesure de la densité de puissance doit être compensée. Dans ce cas, l'incertitude relative à la dérive du DUT peut être indiquée comme nulle.
- g) La compensation de la densité de puissance pour la dérive du DUT est appliquée à l'aide de la Formule (23).

$$PD_{\text{compensated}} = PD_{\text{measured}} \times \left(1 + \frac{|drift|}{100 \%} \right) \quad (23)$$

- h) La dérive du DUT peut également être directement appliquée aux valeurs de mesure pendant le balayage, selon la Formule (24).

$$PD_{\text{compensated}} = PD_{\text{measured}} \times \left(1 + \left| \frac{Ref_i - Ref_1}{Ref_1} \right| \right) \quad (24)$$

La propagation de l'incertitude due à cette compensation locale doit être bien documentée et appliquée.

7.5 Combinaison d'expositions

7.5.1 Généralités

Pour les DUT équipés de plusieurs antennes ou de plusieurs émetteurs (à antennes simples ou multiples) qui émettent simultanément, les expositions doivent être combinées. Le présent paragraphe décrit comment combiner les expositions pour s'assurer que l'exposition totale soit inférieure à la limite.

Le rapport d'exposition totale (TER) est calculé en combinant toutes les mesures du DAS et toutes les mesures de la densité de puissance après normalisation en fonction de leurs limites respectives. L'expression générale pour les signaux non corrélés est la Formule (25). Des expressions spécifiques sont données en 7.5.2.

$$TER(r) = \sum_{n=1}^N \frac{SAR_{avg,n}(r, f_m)}{SAR_{limit,n}} + \sum_{m=1}^M \frac{sPD_m(r, f_m)}{S_{limit,m}(f_m)} \quad (25)$$

où:

- r est un point sur la surface d'évaluation;
- $TER(r)$ est le rapport d'exposition totale au point r ;
- $SAR_{avg,n}(r)$ est la n e valeur du DAS moyenné dans l'espace au point r ;
- $SAR_{limit,n}$ est la valeur limite de $SAR_{avg,n}(r)$;
- $sPD_m(r, f_m)$ est la m e valeur de la sPD au point r et à la fréquence f_m ;
- $S_{limit,m}(f_m)$ est la valeur limite selon la recommandation d'exposition à la fréquence f_m .

Le TER doit être inférieur à 1 pour assurer la conformité aux limites.

NOTE 1 La Formule (25) peut être adaptée à d'autres indicateurs d'exposition que le DAS, le cas échéant, pour les limites des champs électriques ou magnétiques à des fréquences plus faibles, par exemple.

NOTE 2 SAR et S (sPD) sont toujours non corrélés.

Les méthodes de combinaison de la densité de puissance dépendent de la corrélation ou non des signaux dans le temps (voir également l'IEC TR 62630:2010 [6]) et de l'émission éventuelle du dispositif dans des bandes de fréquences inférieures lorsque le DAS constitue la restriction de base pertinente. Les signaux émis simultanément par un DUT relèvent des trois catégories suivantes de corrélations dans le temps.

- a) Les signaux corrélés de type 1 emploient généralement des techniques de filtrage spatial permettant d'utiliser plusieurs antennes pour orienter le faisceau afin d'améliorer la communication. Les antennes sont alimentées par des signaux dont les phases relatives varient lentement par rapport à la durée du symbole de communication.

Les signaux corrélés de type 1 sont mesurés et combinés de la manière décrite en 7.4. En raison du nombre potentiellement élevé de combinaisons de phase et d'amplitude, la limite supérieure de la distribution de la densité de puissance est déterminée lors de la mesure.

- b) Les signaux corrélés de type 2 présentent des variations de phase rapides par rapport à la durée du symbole. Certaines techniques MIMO utilisent le code de bloc espace-temps pour faire varier la phase d'un symbole à l'autre. Le filtrage spatial n'est pas utilisé pour la corrélation de type 2.

Les signaux corrélés de type 2 sont mesurés par un balayage unique avec un moyennage temporel suffisant en chaque point, de sorte que les caractéristiques du signal soient capturées et que l'incertitude du temps d'intégration reste faible. Par définition, un signal corrélé de type 2 n'est corrélé à aucun autre signal, y compris d'autres signaux corrélés de type 2; il est donc traité comme tout autre signal non corrélé aux fins de la combinaison.

- c) Les signaux non corrélés ne sont pas synchronisés dans le temps. Deux signaux qui fonctionnent à des fréquences différentes ou utilisent des modulations différentes sont des exemples de signaux non corrélés.

Toute combinaison de signaux non corrélés peut être mesurée séparément ou conjointement (c'est-à-dire par une mesure unique alors que tous les signaux émettent simultanément), ce qui donne une distribution de la densité de puissance moyennée dans l'espace, $sPD_m(r, f_m)$.

7.5.2 Combinaison des résultats de la densité de puissance et du DAS

- a) Utiliser une surface d'évaluation appropriée contenant les points r . Cette surface d'évaluation doit être commune à toutes les mesures de la densité de puissance et du DAS.
- b) En chaque point r de la surface d'évaluation, évaluer chacune des n valeurs du DAS moyenné dans l'espace, $SAR_{avg,n}(r)$, et chacune des m valeurs de sPD , $sPD_m(r, f_m)$.

La Figure 10 représente la manière dont $SAR_{avg,n}(r)$ et $sPD_m(r, f_m)$ doivent être spécifiés pour une surface d'évaluation de dispositif porté sur le corps (voir 7.2.4.2). Le moyennage spatial est centré au point r , conformément à la norme applicable (par exemple 1 g ou 10 g pour le DAS, 4 cm² sous forme de carré pour la densité de puissance dans l'exemple de la Figure 10). Si le DAS maximal moyenné dans l'espace correspond à un cube qui ne touche pas la surface d'évaluation, ce cube doit être projeté sur la surface d'évaluation sans modifier la valeur du $psSAR$.

NOTE La projection sur la surface d'évaluation d'un cube qui ne touche pas celle-ci est une approche prudente. Dans ce cas, l'utilisation du $psSAR$ pour le cube situé sur la surface débouche sur une sous-estimation de l'exposition combinée.

- c) La Figure 11 représente la manière dont $SAR_{avg,n}(r)$ et $sPD_m(r, f_m)$ sont spécifiés pour une surface d'évaluation du mode voix (voir 7.2.4.3). Au niveau du pavillon du fantôme SAM, la surface d'évaluation pour le DAS est différente de la surface d'évaluation pour la densité de puissance, ce qui signifie que les points spécifiés pour la combinaison (par exemple r_1 sur la Figure 11) sont différents. Autrement, les points r (par exemple r_2 sur la Figure 11) sont identiques pour la combinaison du DAS et de la densité de puissance.
- d) Normaliser chacune des valeurs de $SAR_{avg,n}(r)$ à sa limite, $SAR_{limit,n}$.
- e) Normaliser chacune des valeurs de $sPD_m(r, f_m)$ à sa limite, $S_{limit,m}(f_m)$.
- f) En chaque point r de la surface de l'évaluation, effectuer la somme linéaire des distributions de sPD normalisées, parmi toutes (de $m = 1$ à M) les mesures (y compris toutes les combinaisons mesurées). Sont inclus les signaux non corrélés, les signaux corrélés de type 2 et la sPD maximale des signaux corrélés du 7.4.2.
- g) Si certaines des M distributions de sPD ne sont pas connues, leurs valeurs de $psPD$ doivent être ajoutées à la $psPD$ des distributions combinées dans l'espace, à moins que les valeurs de $psPD$ ne se trouvent en des emplacements différents et que les additionner donne une $psPD$ totale supérieure de moins de 5 %.
- h) En chaque point r de la surface d'évaluation, combiner toutes les mesures du DAS (de $n = 1$ à N) de la manière décrite au 7.4.4 de l'IEC/IEEE 62209-1528:2020.
- i) Le TER correspond à la plus haute exposition parmi tous les points r de la surface d'évaluation, selon la Formule (26):

$$TER = \max_r \left\{ \sum_{n=1}^N \frac{SAR_{avg,n}(r, f_n)}{SAR_{limit,n}} + \sum_{m=1}^M \frac{sPD_m(r, f_m)}{S_{limit,m}(f_m)} \right\} \quad (26)$$

La Formule (26) ne peut être utilisée directement que si les N distributions du DAS moyenné dans l'espace, $SAR_{avg,n}(r, f_n)$, et les M distributions de la sPD , $sPD_m(r, f_m)$, sont connues pour tous les emplacements r sur la surface d'évaluation.

- j) Si la distribution dans l'espace du $psSAR$ combiné de l'IEC/IEEE 62209-1528:2020, $psSAR_{combined}$, n'est pas connue, mais que les M distributions de la sPD sont connues, le TER est calculé à l'aide de la Formule (27).

$$TER = TER_{SAR} + TER_S = \frac{psSAR_{combined}}{psSAR_{limit}} + \max_r \left\{ \sum_{m=1}^M \frac{sPD_m(r, f_m)}{S_{limit,m}(f_m)} \right\} \quad (27)$$

Etant l'estimation la plus prudente, le terme TER_S de la Formule (27) peut également être calculé à l'aide de la somme de la $psPD$, indépendamment de l'emplacement spatial, c'est-à-dire comme la somme directe des rapports d'exposition maximaux.

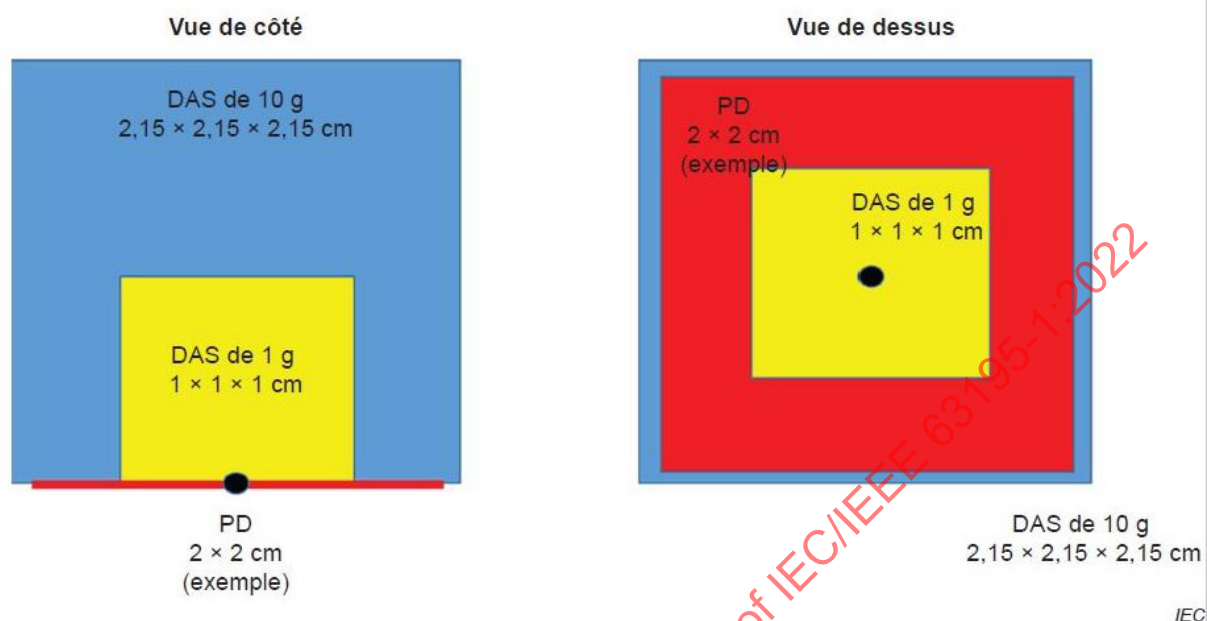
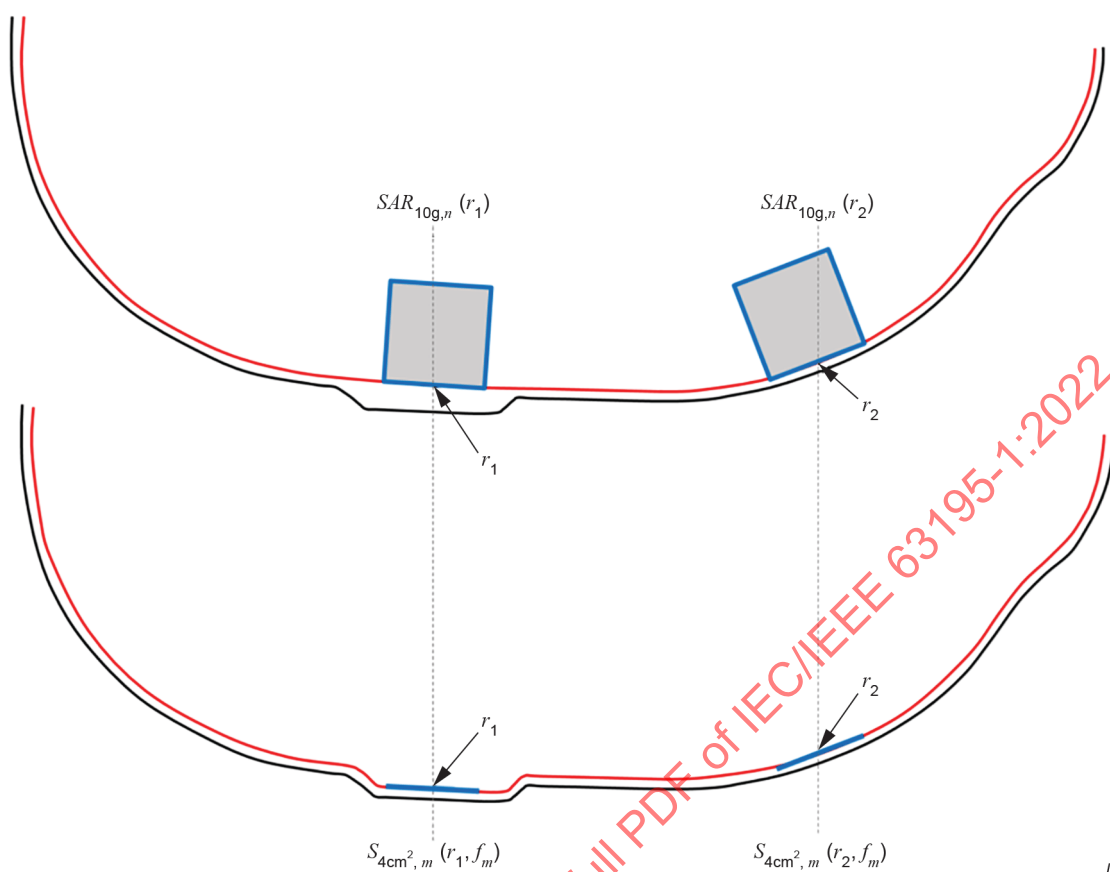


Figure 10 – Evaluation du DAS et de la densité de puissance en un point r



NOTE Les surfaces d'évaluation sont représentées en rouge. Au niveau du pavillon, le cube de moyennage du DAS et la zone de moyennage de la densité de puissance sont combinés en des points (par exemple r_1) qui sont différents dans l'espace. Sinon, les points (par exemple r_2) sont identiques pour le DAS et la densité de puissance.

Figure 11 – Combinaison du DAS (en haut) et de la densité de puissance (en bas) pour le fantôme SAM

8 Estimation de l'incertitude

8.1 Généralités

Le bilan d'incertitudes est applicable aux mesures de la densité de puissance en ce qui concerne la tête, le corps ou des surfaces d'évaluation spécifiques. Le Tableau 3 (voir 8.6) est un modèle et le Tableau 4 est un exemple de bilan d'incertitudes pour une mesure de la densité de puissance moyennée dans la zone d'un DUT sur 4 cm² ou 1 cm².

Une approche fondée sur les performances est utilisée dans le présent document, ce qui permet l'application de plusieurs types différents de techniques de mesure et met l'accent sur la validation afin de fournir un certain niveau de confiance concernant les résultats. Les bilans d'incertitudes peuvent donc différer en fonction des différentes techniques de mesure.

Chaque grandeur d'entrée est décrite accompagnée d'un exemple présentant la façon dont l'incertitude type associée est évaluée. Il s'agit d'exemples généraux qui peuvent ne pas être applicables à tous les systèmes de mesure, et des grandeurs supplémentaires peuvent être exigées dans un cas spécifique.

8.2 Exigences relatives aux évaluations de l'incertitude

L'incertitude élargie est le résultat d'une évaluation de l'incertitude, dont les détails spécifiques sont enregistrés dans un bilan d'incertitudes. L'incertitude élargie doit être exprimée en pourcentage en cas de distribution normale ou en dB en cas de distribution logarithmique normale, comme cela est indiqué par le fabricant du système.

Des bilans d'incertitudes distincts doivent être évalués pour les mesures de la densité de puissance, conformément à ce qui suit:

- a) le fabricant du système de mesure est chargé de déterminer toutes les composantes d'incertitude données en 8.4 et 8.5, à l'exception de l'alignement du DUT (*DA*), des conditions ambiantes (*AC*) et de la dérive du DUT (*DRI*), qui relèvent de la responsabilité du laboratoire de mesure;
- b) l'incertitude élargie concernant la valeur mesurée de la densité de puissance moyennée dans la zone (par exemple 4 cm²) doit être évaluée conformément aux recommandations et explications fournies dans le Guide 98-3 de l'ISO/IEC [18];
- c) la plage de fréquences pour laquelle l'analyse de l'incertitude est valide doit être spécifiée;
- d) l'incertitude indiquée doit représenter l'incertitude élargie maximale dans cette plage;
- e) l'incertitude élargie pour la vérification relative du système, la vérification absolue du système et les mesures de validation du système doit également être évaluée. L'incertitude doit être donnée au niveau de confiance de 95 %, et l'incertitude élargie ($k = 2$) ne doit pas dépasser 2 dB (58 %/–37 %) par rapport à la valeur de la *psPD* de 20 % (moins de –7 dB) à 200 % (plus de +3 dB) de la limite d'exposition applicable;
- f) si l'incertitude élargie est supérieure à 2 dB (58 %/–37 %), les données consignées doivent tenir compte de la différence en pourcentage entre l'incertitude réelle et la valeur cible de 2 dB (58 %/–37 %); par exemple, voir la méthode indiquée dans l'IEC 62311:2019 [9].

8.3 Description des modèles d'incertitude

L'incertitude type composée de la densité de puissance mesurée est la somme quadratique des contributions à l'incertitude, suivant les recommandations du Guide 98-1 de l'ISO/IEC [19] et du Guide 98-3 de l'ISO/IEC [18]. Les termes d'incertitude suivants ont une influence sur l'incertitude type composée:

- a) les termes d'incertitude dépendant du système de mesure (voir 8.4);
- b) les termes d'incertitude dépendant du dispositif en essai (DUT) et des facteurs environnementaux (voir 8.5).

La combinaison des termes d'incertitude afin de déterminer l'incertitude élargie totale est décrite en 8.6.

Les modèles d'incertitude de l'Article 8 sont décrits sous le format suivant:

$$\Delta PD = X_1 + X_2 + \dots$$

ΔPD est la grandeur de sortie correspondant à l'incertitude composée de l'évaluation de la densité de puissance. Les grandeurs d'entrées sont décrites par les symboles indiqués en 8.4 et 8.5.

Pour la mesure d'un DUT ou d'une antenne (sans combinaison d'expositions), l'incertitude totale correspond à la combinaison des composantes selon la Formule (28):

$$\begin{aligned} \Delta PD = & CAL + COR + FRS + SCC + ISO + LIN + PSC + PPO + PPR + SMO \\ & + FLD + MED + APN + TR + DAQ + SMP + REC + SNR + TRA + SCA + SAV \\ & + PC + MOD + IT + RT + DH + DA + AC + TEM + REF + MSI + DRI \end{aligned} \quad (28)$$

Pour la répétabilité de mesure d'un DUT ou d'une antenne (sans combinaison d'expositions), l'incertitude totale correspond à la combinaison des composantes selon la Formule (29):

$$\begin{aligned} \Delta PD = & ISO + LIN + PPO + PPR + PSR + MED \\ & + APN + TR + SMP + REC + SNR + TRA + SCA \\ & + SAV + PC + DH + DA + AC + MSI + DRI \end{aligned} \quad (29)$$

8.4 Termes d'incertitude dépendant du système de mesure

8.4.1 CAL – Etalonnage de l'équipement de mesure (CALibration)

L'incertitude de l'étalonnage est évaluée et documentée par le fabricant du système de mesure. Selon la mise en œuvre du système, la sonde de champ est directement étalonnée avec son électronique de lecture ou bien l'électronique de lecture est étalonnée séparément. Dans ce dernier cas, l'incertitude de l'étalonnage doit également tenir compte de l'influence de la connexion de la sonde et de l'électronique de lecture après l'étalonnage, notamment des pertes de connecteur et de la désadaptation d'impédance.

8.4.2 COR – Correction de la sonde

La correction de la sonde représente la différence entre les propriétés de réception de la sonde de champ physique et celles d'une sonde idéale mesurant le champ en un point de l'espace. Ce fait est particulièrement important à proximité immédiate d'une source où les champs peuvent varier de façon significative sur le volume de la sonde. Plus d'informations sont disponibles dans l'IEEE Std 1720:2012 [20] en ce qui concerne la correction de la sonde pour des mises en œuvre spécifiques dans le champ proche (planaire, cylindrique et sphérique). L'incertitude relative aux propriétés de réception de la sonde de champ qui ont une incidence sur la correction de la sonde est incluse.

8.4.3 FRS – Réponse en fréquence (Frequency ReSponse)

8.4.3.1 Généralités

Les sondes de champ n'ont pas une réponse en fréquence uniforme. La réponse en fréquence dépend du type et de la taille de la sonde de champ et est évaluée lors de l'étalonnage de la sonde de champ.

L'incertitude relative à la réponse en fréquence dépend des caractéristiques de l'unité d'acquisition du système. Deux cas principaux sont présentés en 8.4.3.2 et 8.4.3.3.

8.4.3.2 Systèmes d'intégration en fréquence

Pour la mesure des signaux à large bande, en particulier si le réglage de la fréquence dans le logiciel est décalé par rapport au centre de la densité de puissance spectrale du signal, $A(f)$, l'incertitude FRS doit être prise en compte. Par exemple, cela peut se produire si les ressources-blocs présentent un décalage par rapport à la fréquence médiane.

L'incertitude complémentaire due au déséquilibre spectral peut être calculée pour les signaux situés entre des signaux ayant une largeur de bande (BW) avec f_0 au centre de la largeur de bande. La densité de puissance spectrale du signal moyennée dans le temps en fonction de la fréquence est $A(f)$.

La contribution à l'incertitude FRS peut être approximée à l'aide de la Formule (30):

$$FRS = s(f_0) \times \left| \frac{\int_{(f_0-BW/2)}^{(f_0+BW/2)} (f - f_0) \times A(f) df}{\int_{(f_0-BW/2)}^{(f_0+BW/2)} A(f) df} \right| \quad (30)$$

où $s(f_0)$ est le gradient de sensibilité de la sonde, en pourcentage par hertz ou décibel par hertz. Le gradient de sensibilité est calculé comme la variation de la sensibilité sur la plage de fréquences. Il peut correspondre à une valeur fixe ou être fonction de la fréquence médiane, f_0 .

Si une formule autre que la Formule (30) est utilisée, la justification doit être documentée. Par exemple, un système de mesure peut appliquer une pondération spectrale ou d'autres corrections lors du mesurage.

Pour la mesure de plusieurs signaux qui émettent simultanément, l'incertitude relative à la réponse en fréquence doit être évaluée par le fabricant du système de mesure afin de déterminer une limite prudente pour l'incertitude et l'espacement de fréquence maximal qui peut être appliqué pour la transmission simultanée.

8.4.3.3 Systèmes sélectifs en fréquence

Pour un système de mesure capable d'acquérir des séries temporelles du signal souhaité et d'égaliser la réponse en fréquence du système, en utilisant par exemple l'analyse spectrale du signal RF, l'incertitude relative à la réponse en fréquence peut être négligeable.

8.4.4 SCC – Couplage croisé de capteurs (Sensor Cross Coupling)

Pour les sondes équipées de plusieurs capteurs, les capteurs et leurs lignes de transmission sont idéalement isolés les uns des autres. Toutefois, dans la pratique, il peut se produire un couplage croisé qui entraîne l'acquisition d'un signal au niveau d'un accès de capteur du fait d'une lecture de champ au niveau d'un autre capteur. La conception de la ou des sondes et les processus de fabrication peuvent permettre de réduire le plus possible le couplage croisé de capteurs. L'étalonnage peut inclure la compensation du couplage croisé. Cependant, il peut être difficile de supprimer complètement le couplage croisé de capteurs dans la mesure où il dépend de la polarisation, de l'angle d'incidence et de la distribution du champ incident.

L'incertitude relative au couplage croisé de capteurs doit être évaluée en établissant la différence entre la densité de puissance (ou le carré du champ) obtenue en utilisant un capteur isolé et la densité de puissance (ou le carré du champ) obtenue en utilisant le même capteur conjointement avec les autres capteurs. Des antennes avec des polarisations différentes et des angles d'incidence différents sont nécessaires. Les exigences applicables à cette évaluation sont les suivantes:

- les antennes de référence utilisées doivent avoir une pureté de polarisation (rapport copolarisation sur polarisation croisée) supérieure à 10 dB;
- les champs doivent se trouver dans la plage dynamique des capteurs;
- toute compensation du couplage croisé évaluée lors de l'étalonnage doit être appliquée;
- si une compensation est appliquée, l'incertitude de cette compensation doit être consignée et incluse dans l'incertitude totale relative au couplage croisé de capteurs.

8.4.5 ISO – Isotropie

L'isotropie hémisphérique est une mesure de l'écart de réponse de la sonde de champ à la polarisation arbitraire du champ. En général, les champs émis par des dispositifs sans fil portables de petite taille sont de polarisation arbitraire. Dans le champ proche des sources, l'écart par rapport à l'isotropie hémisphérique doit être pris en compte. En cas d'évaluations dans le champ lointain avec une direction de propagation connue, l'incertitude peut être réduite à l'écart par rapport à l'isotropie axiale. Si la mesure isotropique exige plusieurs mesures avec différentes orientations de sonde (par exemple, voir Pfeifer et al. [4]), l'évaluation de l'incertitude doit alors être réalisée à l'aide de la procédure de mesure et de post-traitement correspondante.

8.4.6 LIN – Erreur de linéarité du système

L'évaluation de l'erreur de linéarité du système doit être effectuée de manière telle que tous les composants du système qui introduisent des non-linéarités potentielles soient évalués. Par exemple, si une sonde de champ ne contient aucun élément non linéaire, mais que son électronique de lecture en contient, alors les essais visant à évaluer cette contribution à l'incertitude incluent l'électronique de lecture. Cette évaluation s'effectue en mesurant la densité de puissance sur la plage dynamique du système de mesure et en déterminant l'écart maximal par rapport à la ligne droite la mieux adaptée qui passe par l'origine.

Cette évaluation s'effectue par un balayage de puissance couvrant une densité de puissance de l'ordre de 10 % à 1 000 % de la limite de sPD applicable (valeur efficace pour les signaux CW), par paliers de 3 dB ou moins. L'incertitude LIN est définie comme l'écart maximal de la densité de puissance par rapport à la caractéristique de puissance à partir de la ligne droite de référence la mieux adaptée qui passe par zéro spécifiée sur l'intervalle de 10 % à 1 000 % de la limite de sPD applicable ($PD = a \times P$, où a est la pente la mieux adaptée de la ligne, en utilisant la méthode des moindres carrés).

L'incertitude LIN pour un signal CW est déterminée selon la Formule (31):

$$LIN [\%] = \max_j \left\{ \max_{PD_l \leq PD(P_i)_{CW,j} \leq PD_h} \left(100 \% \times \left| \frac{PD(P_i)_{CW,j}}{a \times P_i} - 1 \right| \right) \right\} \quad (31)$$

Ici, $PD(P_i)_{CW,j}$ est la densité de puissance mesurée pour un signal CW au i ème niveau de puissance P_i , $PD_l = 10 \%$, et $PD_h = 1\,000 \%$ de la limite de sPD applicable. L'indice j se réfère à tout capteur de sonde pour lequel la procédure doit être répétée. Une loi de probabilité rectangulaire est admise par hypothèse pour l'incertitude relative à l'erreur de linéarité du système.

S'il est nécessaire de mesurer des valeurs de densité de puissance particulièrement élevées ou particulièrement faibles, la plage de densité de puissance faible à élevée utilisée aux fins de l'étude (10 % à 1 000 % de la limite de sPD applicable) peut être étendue pour couvrir l'ensemble de la plage dynamique du système spécifiée par le fabricant du système.

8.4.7 PSC – Diffusion de la sonde (Probe SCattering)

Le champ diffusé par une sonde de champ est en partie rétrodiffusé vers le DUT pour être émis de nouveau. Cet effet dépend de la fréquence, de la structure de la sonde de champ et de la distance de la sonde de champ par rapport au DUT. Les erreurs de réflexion diminuent généralement lorsque la distance de mesure augmente. Pour les sondes à guide d'ondes miniatures rectangulaires ou circulaires, quelques longueurs d'onde sont généralement nécessaires pour éviter toute perturbation inacceptable du champ. Pour les antennes de DUT à faible directivité, la distance peut être réduite. Les perturbations de champ des sondes constituées d'un petit dipôle ou de petits capteurs à boucle sur le champ mesuré peuvent être suffisamment faibles pour des distances réduites jusqu'à une longueur d'onde ou même à des fractions d'une longueur d'onde.

Dans la mesure où cet effet est une caractéristique d'une sonde spécifique, il est déterminé par le fabricant du système lors de l'étalonnage de la sonde de champ. Si des algorithmes sont appliqués pour compenser les réflexions multiples, l'incertitude de la densité de puissance peut être déterminée à l'aide des mêmes matériel et logiciel d'évaluation que ceux utilisés pour réaliser les mesures.

8.4.8 PPO – Décalage de positionnement de la sonde (Probe Positioning Offset)

Le système de balayage positionne la sonde de champ dans la région de mesure. Les écarts relatifs aux emplacements des sondes de champ par rapport aux emplacements réels sur la région de mesure en ce qui concerne le dispositif entraînent une incertitude de mesure de la $psPD$ et des erreurs lors de la combinaison d'expositions à partir d'émetteurs simultanés. Il s'agit d'une incertitude absolue et non d'une incertitude relative, car elle suit un rapport unitaire pour l'évaluation de la surface (par exemple, si la distance de mesure est de 200 mm et la distance d'évaluation de 2 mm, un écart de 0,5 de la surface de mesure (200,5 mm) donne une surface d'évaluation de 2,5 mm au lieu de 2 mm). Pour cette raison, le 6.5 contient les exigences et les procédures relatives au positionnement et à l'orientation absolus de la sonde.

Ce terme d'incertitude est dû à l'exactitude du positionnement et de l'orientation absolus de la sonde. Il résulte de biais de positionnement dans le système de positionnement mécanique et d'erreurs dans la procédure de positionnement. Un deuxième terme d'incertitude, PPR , correspond à la répétabilité du positionnement de la sonde de champ (voir 8.4.9).

La procédure d'évaluation de l'incertitude PPO est la suivante:

- déterminer le décalage mécanique le plus défavorable de la position de la sonde de champ par rapport au DUT. Pour ce faire, mesurer l'emplacement de la sonde de champ par rapport à un point de référence. Le point de référence doit se trouver aux emplacements de la région de mesure les plus proches pris en charge par le système de mesure;
- procéder à la validation du système décrite à l'Article A.5;
- décaler mécaniquement l'emplacement de la sonde de champ suivant le décalage déterminé à l'étape a) puis répéter la validation du système;
- calculer l'incertitude comme l'écart entre les valeurs de $psPD$ obtenues à partir des validations du système de l'étape b) et de l'étape c), c'est-à-dire $(|psPD_b - psPD_c| / psPD_b)$. Une loi de probabilité rectangulaire est appliquée.

Cette incertitude peut être exprimée en fonction de la fréquence, ou comme la valeur maximale dans la plage de fréquences évaluée.

8.4.9 PPR – Répétabilité du positionnement de la sonde (Probe Positioning Repeatability)

Cette incertitude est due à la répétabilité du positionnement de la sonde de champ plutôt qu'au décalage. La répétabilité du positionnement est due à l'exactitude finie du positionnement et à l'aptitude du système de positionnement à localiser de façon répétée la sonde de champ au même emplacement. L'écart de position de la sonde de champ peut varier d'un emplacement à l'autre sur la région de mesure.

Ce terme d'incertitude peut être évalué à l'aide d'un ensemble de distributions de référence générées numériquement pour les champs vectoriels des sources de validation de l'Annexe B. La procédure est la suivante:

- a) pour chaque distribution numérique, le champ est échantillonné en des points et dans des polarisations qui correspondent à la grille de mesure appliquée par le système physique;
- b) à partir de ces données échantillonnées d'origine, la densité de puissance maximale moyennée dans l'espace est calculée en utilisant le même traitement que celui utilisé pour les mesures effectuées avec ce système particulier. Cela permet d'obtenir la valeur de référence, $psPD_{ref,i}$, pour chaque cas de distribution de champ i (un nombre de i distributions par fréquence est admis par hypothèse);
- c) la tolérance connue sur la répétabilité du positionnement de la sonde est utilisée pour générer des grilles de balayage de mesure G_j ($j = 1$ à J) impactées par des erreurs de répétabilité. Le fabricant doit établir un modèle pour représenter ces erreurs mécaniques. Par exemple, chaque tolérance peut avoir une distribution rectangulaire ou triangulaire si le fabricant spécifie des écarts maximaux acceptables par rapport aux emplacements nominaux. Dans le cas des sondes mobiles, l'incertitude de répétabilité du positionnement des sondes doit être incluse dans l'erreur mécanique. J distributions échantillonnées de chaque champ vectoriel de référence sont ensuite créées à l'aide des grilles d'échantillonnage G_j ;
- d) pour chaque champ de référence i et chaque grille j , les algorithmes de reconstruction du système de mesure sont appliqués pour calculer la densité de puissance maximale moyennée dans l'espace, $psPD_{ref,i,j}$. Le logiciel doit prendre pour hypothèse les positions idéales des points sur la grille. Par conséquent, les algorithmes sont utilisés comme si les valeurs de champ échantillonnées étaient obtenues à partir d'une position parfaitement connue, alors que le système échantillonne en réalité le champ sur une grille qui s'écarte des emplacements ciblés;
- e) pour chaque paire (i, j) , la différence relative $(psPD_{ref,i,j} - psPD_{ref,i}) / psPD_{ref,i}$ est calculée;
- f) U_i est calculé pour chaque configuration de champ de référence i comme le 95e centile de la valeur absolue de la différence relative pour tous les J emplacements de sonde de champ sur la grille. L'incertitude est estimée comme la valeur efficace de U_i dans la plage de fréquences applicable pour toutes les I conditions d'exposition. Cette valeur est calculée sur $I \times J$ cas, avec $I \times J - 1$ degrés de liberté. Une distribution normale est admise par hypothèse;
- g) la tolérance évaluée valide à l'emplacement du capteur de sonde doit être convertie en incertitude pour la densité de puissance maximale moyennée dans l'espace et indiquée dans le Tableau 3. La translation est une fonction de la reconstruction 3D réelle mise en œuvre et ne peut être effectuée que par le fabricant du système. Toutes les étapes doivent être documentées.

8.4.10 *SMO* – Décalage mécanique du capteur (Sensor Mechanical Offset)

Cette incertitude est due à des incertitudes mécaniques concernant l'emplacement du capteur à l'intérieur du boîtier de la sonde de champ lors de la fabrication. Elle est différente du décalage de positionnement de la sonde de champ, qui est dû à l'erreur du système de positionnement mécanique. Toutefois, ces deux termes d'incertitude peuvent être évalués conjointement. Il convient de déterminer l'emplacement du capteur à l'intérieur du boîtier de la sonde de champ lors de l'étalonnage de la sonde de champ. L'erreur résiduelle concernant l'emplacement du capteur est convertie en incertitude de $psPD$ en appliquant la même procédure que pour l'incertitude *PPO*.

8.4.11 *PSR* – Résolution spatiale de la sonde (Probe Spatial Resolution)

Il s'agit de l'incertitude de la sonde de champ permettant de résoudre la densité de puissance locale maximale; elle est due à la taille finie de la sonde. Idéalement, une sonde de champ de taille infinitésimale capte le champ à l'emplacement de la sonde de champ. Dans la pratique, la taille de la sonde de champ entraîne l'intégration mécanique du champ dans la zone du capteur. S'il y a plusieurs capteurs dans une sonde, le déplacement physique des capteurs peut également avoir une incidence sur l'aptitude de la sonde de champ à capter le champ avec précision. Cela se traduit par une sous-estimation du champ de crête, même si une compensation peut être appliquée lors de l'étalonnage.

8.4.12 *FLD* – Influence de l'impédance de champ (Field impedance dependence) (rapport $|E|/|H|$)

Pour certaines sondes de champ (guides d'ondes, par exemple), la mesure du champ est sensible au rapport entre l'amplitude du champ E et l'amplitude du champ H locales. Dans le champ proche (c'est-à-dire à des distances entre le DUT et la sonde de champ inférieures à la distance minimale du Tableau 2), l'impédance de champ diffère de l'impédance caractéristique de l'espace libre. La sensibilité par rapport à la densité de puissance doit être caractérisée par des évaluations expérimentales ou numériques en exposant les capteurs à différentes impédances de champ (voir les recommandations dans l'Annexe D de l'IEC TR 63170:2018 [10]). L'incertitude peut être réduite si les conditions d'une plage d'impédances de champ restreinte peuvent être spécifiées, par exemple une distance minimale entre la source et la sonde.

8.4.13 *MED* – Dérive de mesure (MEasurement Drift)

Ce terme décrit l'influence d'une dérive de mesure (à la fois en amplitude et en phase) à court terme et à long terme sur la densité de puissance mesurée. Il n'est pas lié à la dérive du DUT. Les dérives à court terme (par exemple sur une période de quelques minutes ou quelques heures) sont dues à des influences telles que l'échauffement de l'équipement, les perturbations électromagnétiques et les variations des conditions ambiantes. Les dérives à long terme (par exemple sur une période de plusieurs jours à plusieurs mois) sont dues à la dérive des composants, à la stabilité de l'amplificateur et aux fluctuations à long terme des paramètres diélectriques des matériaux de la sonde de champ et de l'équipement de mesure associé.

L'incertitude relative à la dérive de mesure est évaluée par l'analyse tendancielle des mesures de la densité de puissance relevées à différents instants. La dérive à court terme et la dérive à long terme sont évaluées séparément puis combinées en prenant pour hypothèse qu'elles sont statistiquement indépendantes.

8.4.14 *APN* – Bruit d'amplitude et de phase (Amplitude and Phase Noise)

Il s'agit du bruit des composants du système de mesure. Le bruit d'amplitude et de phase correspond à des fluctuations aléatoires de la mesure dues à des variations à court terme telles que le bruit des composants. Cette incertitude est évaluée à partir des données relevées pour estimer l'incertitude due aux dérives d'amplitude et de phase à court terme. Cette incertitude peut être évaluée à partir des données de mesure relevées à différentes fréquences de la plage applicable et, le cas échéant, pour tous les états du système. Par exemple, si un système comprend des amplificateurs avec plusieurs états de gain, l'analyse de l'incertitude peut être effectuée sur des données obtenues pour tous les états de gain possibles.

8.4.15 *TR* – Troncature de la zone de mesure

Cette valeur d'incertitude moyennée dans l'espace est due à la troncature des données dans la région de mesure.

8.4.16 *DAQ* – Acquisition de données (Data AcQuisition)

Les incertitudes relatives à l'électronique de lecture des sondes de champ doivent être évaluées pour l'électronique de lecture de la sonde de champ. Toutes les incertitudes liées à l'électronique de lecture de la sonde, notamment le gain et la linéarité de l'amplificateur de mesure, son effet de charge sur la sonde et l'exactitude de l'algorithme de conversion du signal, doivent être évaluées afin d'estimer l'incertitude de $psPD$ maximale. Une méthode permettant de déterminer ces composantes d'incertitude consiste à remplacer la sonde de champ par une source équivalente présentant la même impédance de source que la sonde de champ à l'étude, selon les spécifications du fabricant pour la sonde. Cette opération est généralement effectuée par le fabricant du système. Chaque incertitude doit être convertie en une incertitude type en utilisant une loi de probabilité normale. La valeur RSS de ces incertitudes doit ensuite être utilisée pour déterminer l'incertitude globale de l'électronique de lecture.

8.4.17 *SMP* – Echantillonnage (SaMPLing)

La distribution de la $psPD$ est estimée au moyen de la reconstruction de champ à partir de l'échantillonnage direct du champ en un ensemble de points discrets. Si la résolution d'échantillonnage est grossière comparée aux gradients de la distribution de la $psPD$ induite, la crête moyennée dans l'espace peut être inexacte.

L'évaluation de cette incertitude peut être combinée à l'évaluation de l'incertitude des algorithmes de reconstruction.

L'incertitude est évaluée à l'aide d'un ensemble de distributions de référence générées numériquement pour les champs vectoriels couvrant les sources de validation de l'Article E.5.

Déplacer chaque fonction de référence sur plusieurs points dans les directions x et y autour de l'emplacement de référence. Les points sont spécifiés pour une résolution qui ne dépasse pas 1 mm par rapport au point central, étendant la moitié de la résolution du capteur de sonde dans les deux directions. Les valeurs sont évaluées à la résolution d'échantillonnage de l'équipement de mesure de la $psPD$. Les valeurs sont entrées dans le logiciel du système de mesure qui calcule la densité de puissance maximale moyennée dans l'espace à l'aide des algorithmes de reconstruction comme si elles étaient effectivement mesurées. Les valeurs de sPD qui en résultent sont comparées aux valeurs de $psPD$ de référence. Enregistrer l'écart maximal de la valeur de sPD par rapport à la cible. Une loi de probabilité rectangulaire est admise par hypothèse.

8.4.18 *REC* – Reconstruction de champ

Les techniques numériques appliquées pour reconstruire la distribution de la densité de puissance à partir des champs mesurés introduisent des erreurs. Il convient d'estimer leur incertitude.

Un ensemble de distributions numériques 3D de référence du champ E ou du champ H par fréquence (voir la fonction analytique de référence à l'Article E.5) est utilisé.

- Pour chaque distribution numérique i , la densité de puissance maximale moyennée dans l'espace est déterminée sur la région de mesure. Cela donne la valeur de référence $psPD_{ref,i}$.
- La $psPD_i$ maximale moyennée dans l'espace sur la région de mesure est calculée à partir de la i -e distribution 3D de référence du champ. Il convient d'utiliser le même algorithme de reconstruction que celui utilisé pour les mesures.
- Pour chaque distribution, la différence relative $(psPD_i - psPD_{ref,i}) / psPD_{ref,i}$ est calculée.
- L'incertitude est estimée pour la différence relative maximale dans la plage de fréquences applicable, calculée à partir des différences relatives des i cas. Une distribution rectangulaire est admise par hypothèse.

8.4.19 SNR – Rapport signal sur bruit (Signal to Noise Ratio)

La méthode d'évaluation appliquée est sensible au rapport signal sur bruit. Le rapport signal sur bruit minimal (SNR) pour lequel l'incertitude est déterminée doit être spécifié. Le bilan d'incertitudes n'est par conséquent valide que pour les signaux supérieurs au SNR .

Un ensemble de distributions numériques 3D de référence du champ E ou du champ H par fréquence (par exemple, les sources de validation de l'Annexe B) est utilisé.

- Pour chaque distribution numérique i , la $psPD$ maximale moyennée dans l'espace est déterminée sur la région de mesure. Cela donne la valeur de référence $psPD_{ref,i}$.
- La $psPD_i$ maximale moyennée dans l'espace sur la région de mesure est calculée à l'aide de données d'entrée de mesure simulées avec un bruit gaussien complexe (amplitude et phase). Il convient d'utiliser le même algorithme de reconstruction que celui utilisé pour les mesures.
- Répéter l'étape b) 20 fois.
- Pour chaque distribution, déterminer l'écart-type de la différence relative $(psPD_i - psPD_{ref,i}) / psPD_{ref,i}$.
- L'incertitude est estimée pour l'écart-type maximal. Une distribution normale est admise par hypothèse.

8.4.20 TRA – Transformation directe et transformation inverse

Ce terme d'incertitude décrit les erreurs dues à la transformation de la densité de puissance de la région de mesure vers la surface d'évaluation. Une transformation inverse ou directe peut être utilisée.

Un ensemble de fonctions analytiques de référence décrites à l'Article E.5 contenant les distributions 3D du champ E ou du champ H par fréquence (le jeu de fréquences étudié est le même que celui utilisé pour la validation du système ou diffère de 100 MHz au plus) est utilisé.

- Pour chaque distribution numérique i , la $psPD$ est déterminée sur la région de mesure. Il convient de choisir la distribution du champ utilisée comme entrée pour l'algorithme en fonction de la distance de séparation de mesure minimale indiquée dans le manuel utilisateur. Cela donne la valeur de référence $psPD_{ref,i}$.
- La $psPD_{ref,i,j}$ maximale moyennée dans l'espace sur la j e surface est calculée à partir de la transformation de chacune des $psPD_{ref,i}$. Il convient d'utiliser les mêmes algorithmes de transformation directe et inverse que ceux utilisés pour les mesures. Si la méthode repose sur une propagation ou une transformation inverse et si une technique sans phase est utilisée, il convient de ne prendre en compte que l'amplitude du champ.
- Pour chaque paire (i, j) , la différence relative $(psPD_{i,j} - psPD_{ref,i,j}) / psPD_{ref,i,j}$ est calculée.

- d) L'incertitude est estimée comme la valeur efficace maximale dans la plage de fréquences applicable, calculée à partir des différences relatives des $I \times J$ cas. Une distribution normale est admise par hypothèse.

8.4.21 SCA – Mise à l'échelle de la densité de puissance (SCaling)

Il s'agit de l'incertitude relative à la procédure de mise à l'échelle de la densité de puissance donnée en 7.4.3. Le rapport R_p est utilisé pour déterminer la $psPD$ d'un DUT à partir de mesures réalisées alors que le dispositif émet une modulation et/ou une puissance différentes. Si les enveloppes de modulation des deux modes sont identiques, cette erreur correspond à la linéarité du dispositif de mesure de la puissance utilisé. Lorsque les enveloppes de modulation sont différentes, l'effet sur la sensibilité du mesureur de puissance doit également être inclus.

L'incertitude peut être évaluée en mesurant la $psPD$ du DUT à l'emplacement de la densité de puissance maximale dans l'espace pour les deux modes/niveaux de puissance, puis en comparant le rapport obtenu à R_p . Dans ce cas, il convient d'utiliser une loi de probabilité rectangulaire.

8.4.22 SAV – Moyennage spatial (Spatial AVeraging)

L'incertitude relative au moyennage spatial est l'incertitude de la procédure donnée en 7.4.2. La densité de puissance doit être moyennée sur la surface d'évaluation dans la zone de moyennage A_{av} après la reconstruction du champ. Ce terme d'incertitude est dû aux écarts d'aire, de forme et d'orientation de la zone de moyennage par rapport aux spécifications des normes d'exposition. Utiliser les surfaces d'évaluation et les sources de validation fournies à l'Annexe A et à l'Annexe B pour déterminer l'incertitude.

8.4.23 COM – Combinaison d'expositions

Lorsqu'une combinaison d'expositions est utilisée pour déterminer le rapport d'exposition totale, TER (voir 7.5), l'incertitude du TER est la somme quadratique des valeurs individuelles de $psDAS$ et/ou de $psPD$.

Le TER correspond à la plus haute exposition parmi tous les points r de la surface d'évaluation, selon la Formule (27) au 7.5.2:

L'incertitude du TER , U_{TER} , est donc donnée comme la somme quadratique des incertitudes des évaluations du $psDAS$ pour chaque fréquence, $U_{psSAR}(f_n)$, et des incertitudes des évaluations de la $psPD$ pour chaque fréquence, $U_{psPD}(f_m)$, selon la Formule (32):

$$U_{TER} = \sqrt{\sum_{n=1}^N [U_{psSAR}(f_n)]^2 + \sum_{m=1}^M [U_{psPD}(f_m)]^2} \quad (32)$$

8.5 Termes d'incertitude dépendant du DUT et des facteurs environnementaux

8.5.1 PC – Couplage de la sonde avec le DUT (Probe Coupling)

La sonde de champ peut partiellement diffuser la puissance incidente rayonnée par le DUT. En plus de provoquer des réflexions multiples (voir 6.2), la modification de la charge du DUT provoque une réaction de l'amplificateur de puissance susceptible d'ajuster sa puissance de sortie. Ce terme d'incertitude est évalué comme la différence entre le coefficient de transmission du DUT, $T = [1 - S_{11}]^2$, en présence ou en l'absence de la sonde, où S_{11} est l'amplitude du coefficient de réflexion de l'antenne.

L'effet des réflexions multiples est traité en 8.4.7. Le présent paragraphe s'applique au deuxième type d'impact lié à une modification du comportement du DUT. La procédure suivante doit être appliquée:

- a) connecter la source de validation ou un ensemble de sources de référence à l'accès 1 d'un VNA à l'aide d'un câble coaxial RF;
- b) mesurer l'amplitude S_{11} des sources dans la plage de fréquences applicable en l'absence de la sonde;
- c) mesurer l'amplitude S_{11} des sources dans les mêmes conditions en présence de la sonde;
- d) pour chaque source et chaque position d'essai, utiliser la Formule (33)

$$P_{\text{mismatch}} = \left| 1 - \frac{1 - |S_{11, \text{with probe}}|^2}{1 - |S_{11, \text{without probe}}|^2} \right| \quad (33)$$

et l'écart-type relatif de P_{mismatch} dans les conditions d'essai applicables;

- e) consigner la valeur maximale des écarts-types calculés selon d) comme étant la contribution à l'incertitude de mesure de la densité de puissance avec la distribution normale admise par hypothèse.

L'incertitude consignée suivant cette approche peut surestimer l'incertitude réelle. En effet, les amplificateurs de puissance des DUT modernes sont habituellement conçus pour compenser les différences de charge, de sorte que l'amplificateur de puissance applique en général plus de puissance lorsque son impédance de sortie s'éloigne de la zone d'extraction de charge optimale, et moins de puissance lorsque l'adaptation est meilleure. L'incertitude de l'étalonnage doit être évaluée et documentée par le fabricant du système.

8.5.2 MOD – Réponse en modulation

Ce terme d'incertitude est susceptible de ne s'appliquer qu'à certains types de systèmes (par exemple, ceux qui utilisent des sondes à diode). Il peut être évalué à l'aide de toute source de configuration égale ou équivalente à une configuration utilisée pour la vérification du système. La configuration de génération des signaux simule la modulation pour laquelle l'incertitude est déterminée, conformément aux spécifications de la norme du système de communication. La densité de puissance est mesurée avec le signal modulé et avec l'onde entretenue à la même puissance efficace (la vérification que le mesureur de puissance est un détecteur en valeur efficace vraie et que l'amplificateur est suffisamment linéaire pour l'ensemble de la plage dynamique du signal est exigée).

La Formule (34) peut être utilisée pour calculer l'incertitude de modulation pour la modulation particulière $modX$.

$$PD_{modX, \text{unc.}} [\%] = \max_j \left\{ \frac{PD(P_i)_{modX, j} = PD_h}{\max_{PD(P_i)_{modX, j} = PD_l} \left(100 \% \times \left| \frac{PD(P_i)_{modX, j}}{PD(P_i)_{CW, j}} - 1 \right| \right)} \right\} \quad (34)$$

Ici, $PD(P_i)_{CW, j}$ est la densité de puissance mesurée pour un signal CW au i ème niveau de puissance P_i , $PD_l = 0,5 \text{ W/m}^2$, et $PD_h = 500 \text{ W/m}^2$. $PD(P_i)_{modX, j}$ est la valeur correspondante pour le signal modulé. L'indice j se réfère à tout capteur de sonde pour lequel la procédure doit être répétée.

L'incertitude de la densité de puissance est déterminée comme étant la valeur maximale parmi toutes les PD_{modX} , à chaque étape. Une loi de probabilité rectangulaire est admise par hypothèse pour l'incertitude relative à la réponse en modulation de la sonde.

8.5.3 *IT* – Temps d'intégration (Integration Time)

Des incertitudes relatives au temps d'intégration des mesures peuvent survenir lorsque les dispositifs d'essai n'émettent pas un signal continu. Lorsque le temps d'intégration et les intervalles d'échantillonnage discrets utilisés dans l'électronique de la sonde ne sont pas synchronisés avec les caractéristiques pulsées du signal mesuré, l'énergie RF à chaque emplacement de mesure est susceptible de ne pas être entièrement ou correctement capturée.

Il convient de déterminer le temps d'intégration de la sonde à partir des mesures de la densité de puissance à l'aide d'une source stable présentant les mêmes caractéristiques de signal et le même type de sonde de champ que celle utilisée pour les mesures du DUT. Les mesures en un point unique (où la densité de puissance est d'au moins 5 W/m^2) doivent être réalisées consécutivement en utilisant le temps d'intégration choisi puis des temps d'intégration progressivement plus importants. Le temps d'intégration doit être doublé à chaque mesure consécutive jusqu'à ce que la dernière mesure et la suivante se trouvent à 0,5 % ou moins l'une de l'autre. Chaque mesure en un temps d'intégration donné doit être répétée plusieurs fois afin de vérifier que le résultat de la mesure est stable, et la densité de puissance moyenne des mesures répétées doit être utilisée pour ce temps d'intégration. Pour le temps d'intégration de la sonde, une loi de probabilité rectangulaire doit être admise par hypothèse. L'incertitude est la différence en pourcentage entre la densité de puissance moyenne au temps d'intégration choisi et la densité de puissance moyenne au temps d'intégration le plus long.

8.5.4 *RT* – Temps de réponse (Response Time)

L'incertitude relative au temps de réponse du signal de la sonde de champ est évaluée en exposant la sonde de champ à une réponse de champ indicielle produisant une densité de puissance équivalente d'au moins 10 W/m^2 . Le temps de réponse du signal est évalué comme le temps exigé par la sonde de champ et son électronique de lecture pour atteindre 90 % de la valeur finale attendue, produite par la réponse indicielle en activant puis désactivant la puissance RF. Lors du mesurage de la *psPD*, la sonde de champ doit rester stationnaire à chaque emplacement de mesure pendant au moins deux fois le temps de réponse évalué, de sorte que l'incertitude relative au temps de réponse du signal de la sonde de champ soit négligeable. Dans ces conditions de mesure, une valeur de tolérance nulle peut être saisie. Sinon, l'incertitude du temps de réponse doit être évaluée, en utilisant les caractéristiques de signal du dispositif d'essai. Dans ce cas, l'incertitude du temps de réponse indicielle du signal est égale à la différence en pourcentage entre la *psPD* au temps de mesure choisi et la *psPD* mesurée à deux fois le temps de mesure choisi. Une loi de probabilité rectangulaire doit être admise par hypothèse.

8.5.5 *DH* – Influence du support de dispositif (Device Holder influence)

Il s'agit de l'influence du support de dispositif sur l'incertitude de mesure. Elle dépend du DUT. L'erreur doit être évaluée en procédant à des mesures de la *psPD* avec le DUT: a) dans le support de l'appareil, et b) supporté par un bloc de polystyrène. L'incertitude relative à un support de dispositif peut être généralisée de manière à s'appliquer à un certain type de dispositif, à condition que la variabilité parmi un échantillon d'au moins six dispositifs de ce type soit évaluée et qu'un terme d'incertitude supplémentaire de type A soit ajouté afin de tenir compte de cette variabilité.

8.5.6 *DA* – Alignement du DUT (DUT Alignment)

Le système de coordonnées du DUT peut permettre un positionnement précis avec des références mécaniques ou optiques. Ce terme d'incertitude est déterminé en évaluant la densité de puissance pour différentes tolérances mécaniques sur la position du DUT, selon les procédures utilisées pour aligner les coordonnées du DUT sur les coordonnées de référence.

L'incertitude relative à l'alignement du DUT correspond à l'écart maximal de densité de puissance entre le DUT parfaitement aligné et le DUT désaligné. La conversion de l'incertitude maximale relative à l'alignement dans x , y , z (en millimètres) en incertitude relative à la densité de puissance doit être indiquée par le fabricant. Ce terme d'incertitude présente une distribution rectangulaire.

8.5.7 *AC* – Conditions radiofréquences ambiantes (RF Ambient Conditions)

Le niveau RF ambiant est évalué en procédant à des mesures de la densité de puissance avec la même configuration de l'équipement que celle utilisée pour les essais du DUT, mais avec la puissance RF désactivée.

8.5.8 *TEM* - Température du laboratoire

L'influence de la température du laboratoire sur la mesure de la densité de puissance doit être évaluée. Il est recommandé de répéter la vérification relative du système à une certaine fréquence pour les températures de laboratoire comprises entre 18 °C et 25 °C. Appliquer une loi de probabilité rectangulaire à ce terme d'incertitude.

8.5.9 *REF* - Réflexions dans le laboratoire

Ce terme d'incertitude correspond à l'erreur maximale de la densité de puissance due à des objets réfléchissants dans le laboratoire (par exemple à des objets conducteurs ou diélectriques) par rapport à la densité de puissance en l'absence d'objets réfléchissants. Dans la pratique, il est difficile d'éliminer tous les objets réfléchissants, car certains d'entre eux sont nécessaires au système de mesure. Toutefois, des techniques d'atténuation telles que le placement de matériaux absorbants et de ferrites dans le laboratoire peuvent être utilisées pour évaluer l'élimination des objets réfléchissants.

Pour évaluer l'influence des réflexions dans le laboratoire, effectuer un ensemble de vérifications relatives du système (voir 7.2.1) dans la configuration normale (sans techniques d'atténuation) et avec application de l'atténuation. L'incertitude correspond à l'écart maximal, selon une loi de probabilité rectangulaire.

8.5.10 *MSI* – Immunité du système de mesure/réception secondaire (Measurement System Immunity)

Lors du mesurage, le champ rayonné par le DUT peut être capté par des parties du système de mesure autres que les capteurs de sonde. Cela peut entraîner des effets indésirables susceptibles d'augmenter l'incertitude de mesure. La mesure peut par exemple être réalisée en utilisant les sources de validation dans des positions d'essai spécifiées et en bloquant la réception du champ direct de la sonde présumée effectuer la mesure. Il convient de procéder aux mesures de la densité de puissance dans ces conditions et aux fréquences spécifiées pour la validation.

8.5.11 *DRI* – Dérive du DUT (DRift)

La dérive du DUT est prise en compte lors des premières et dernières étapes des processus de mesure spécifiés en 7.4.2. Se référer également au 7.4.4 pour la correction de la dérive du DUT. La dérive DUT (*DRI*) est enregistrée comme la différence en pourcentage de la mesure de référence secondaire, $Ref_{secondary}$, par rapport à la mesure de référence primaire, $Ref_{primary}$, selon la Formule (35):

$$DRI = 100 \% \times \frac{Ref_{secondary} - Ref_{primary}}{Ref_{primary}} \quad (35)$$

8.6 Incertitude composée et élargie

Il convient d'enregistrer les contributions de chaque composante à l'incertitude avec la description, la loi de probabilité, le coefficient de sensibilité, c_i et la valeur d'incertitude $u(x_i)$ de la composante d'incertitude x_i . Une forme tabulaire recommandée est présentée dans le Tableau 3. L'incertitude élargie doit être exprimée en pourcentage en cas de distribution normale ou en dB en cas de distribution logarithmique normale, comme cela est indiqué par le fabricant du système.

Si toutes les composantes d'incertitude x_i sont statistiquement indépendantes, l'incertitude type composée u_c pour la mesure de la densité de puissance moyennée dans l'espace doit être estimée selon la Formule (36):

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 \times u^2(x_i)} \quad (36)$$

Si certaines composantes d'incertitude sont statistiquement dépendantes les unes des autres, la Formule (37) générale peut être appliquée pour calculer l'incertitude type composée:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j)} \quad (37)$$

Dans la Formule (37), $r(x_i, x_j)$ est le coefficient de corrélation calculé selon la Formule (38) à partir de la covariance estimée $u(x_i, x_j)$ associée aux deux composantes x_i et x_j .

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i) u(x_j)} \quad (38)$$

Dans le cas particulier où tous les termes d'incertitude sont entièrement corrélés (c'est-à-dire $r(x_i, x_j) = 1$), l'incertitude est une somme linéaire des composantes individuelles selon la Formule (39):

$$u_c(y) = \sum_{i=1}^m c_i \times u(x_i) \quad (39)$$

Le Guide 98-1 de l'ISO/IEC [19] fournit une description complète, ainsi que des exemples pour l'évaluation de l'incertitude.

L'incertitude élargie U est estimée en multipliant l'incertitude type par un facteur de couverture k représentant un intervalle de confiance de 95 %. Le facteur de couverture est $k = 2$ si l'incertitude composée présente une distribution gaussienne. Sinon, se reporter au Guide 98-1 de l'ISO/IEC [19] pour plus d'informations.

L'évaluation de plusieurs composantes d'incertitude peut être combinée et appréciée directement par la méthode Monte-Carlo ou d'autres méthodes. Dans ce cas, le calcul du coefficient de corrélation peut ne pas être nécessaire.

Tableau 3 – Modèle d'incertitude de mesure pour les mesures de la densité de puissance

Symbole	Source d'incertitude	Description	Inc. $\pm$ dB	Loi de probabilité	Div.	c_i	Incertitude type $\pm$ dB	v_i ou v_{eff}
Termes d'incertitude dépendant du système de mesure								
<i>CAL</i>	Etalonnage	(8.4.1)						
<i>COR</i>	Correction de la sonde	(8.4.2)						
<i>FRS</i>	Réponse en fréquence	(8.4.3)						
<i>SCC</i>	Couplage croisé de capteurs	(8.4.4)						
<i>ISO</i>	Isotropie	(8.4.5)						
<i>LIN</i>	Erreur de linéarité du système	(8.4.6)						
<i>PSC</i>	Diffusion de la sonde	(8.4.7)						
<i>PPO</i>	Décalage de positionnement de la sonde	(8.4.8)						
<i>PPR</i>	Répétabilité du positionnement de la sonde	(8.4.9)						
<i>SMO</i>	Décalage mécanique du capteur	(8.4.10)						
<i>PSR</i>	Résolution spatiale de la sonde	(8.4.11)						
<i>FLD</i>	Influence de l'impédance de champ	(8.4.12)						
<i>MED</i>	Dérive de mesure	(8.4.13)						
<i>APN</i>	Bruit d'amplitude et de phase	(8.4.14)						
<i>TR</i>	Troncature de la zone de mesure	(8.4.15)						
<i>DAQ</i>	Acquisition de données	(8.4.16)						
<i>SMP</i>	Echantillonnage	(8.4.17)						
<i>REC</i>	Reconstruction de champ	(8.4.18)						
<i>SNR</i>	Rapport signal sur bruit	(8.4.19)						
<i>TRA</i>	Transformation directe et inverse	(8.4.20)						
<i>SCA</i>	Mise à l'échelle de la densité de puissance	(8.4.21)						
<i>SAV</i>	Moyennage spatial	(8.4.22)						
<i>COM</i>	Combinaison d'expositions	(8.4.23)						
Termes d'incertitude dépendant du DUT et des facteurs environnementaux								
<i>PC</i>	Couplage de la sonde avec le DUT	(8.5.1)						
<i>MOD</i>	Réponse en modulation	(8.5.2)						
<i>IT</i>	Temps d'intégration	(8.5.3)						
<i>RT</i>	Temps de réponse	(8.5.4)						
<i>DH</i>	Influence du support de dispositif	(8.5.5)						
<i>DA</i>	Alignement du DUT	(8.5.6)						
<i>AC</i>	Conditions radiofréquences ambiantes	(8.5.7)						
<i>TEM</i>	Température du laboratoire	(8.5.8)						
<i>REF</i>	Réflexions dans le laboratoire	(8.5.9)						
<i>MSI</i>	Immunité/réception secondaire	(8.5.10)						
<i>DRI</i>	Dérive du DUT	(8.5.11)						

Symbole	Source d'incertitude	Description	Inc. $\pm$ dB	Loi de probabilité	Div.	c_i	Incertitude type $\pm$ dB	v_i ou v_{eff}
	Incertitude type composée	(8.6)						
	Incertitude élargie (intervalle de confiance de 95 %)	(8.6)						
Il est recommandé de déterminer directement la reconstruction et la transformation directe/inverse à l'aide de données effectivement mesurées ou de données mesurées simulées de sorte que la propagation de l'incertitude et le SNR soient déjà pris en compte.								

Tableau 4 – Exemple de bilan d'incertitudes de mesure pour les résultats de mesure de la densité de puissance

Symbole	Source d'incertitude	Description	Inc. $\pm$ dB	Loi de probabilité	Div.	c_i	Incertitude type $\pm$ dB	v_i ou v_{eff}
Termes d'incertitude dépendant du système de mesure								
<i>CAL</i>	Etalonnage	(8.4.1)	0,49	N	1	1	0,49	∞
<i>COR</i>	Correction de la sonde	(8.4.2)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>FRS</i>	Réponse en fréquence	(8.4.3)	0,2	R	$\sqrt{3}$	1	0,12	∞
<i>SCC</i>	Couplage croisé de capteurs	(8.4.4)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>ISO</i>	Isotropie	(8.4.5)	0,5	R	$\sqrt{3}$	1	0,29	∞
<i>LIN</i>	Erreur de linéarité du système	(8.4.6)	0,2	R	$\sqrt{3}$	1	0,12	∞
<i>PSC</i>	Diffusion de la sonde	(8.4.7)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>PPO</i>	Décalage de positionnement de la sonde	(8.4.8)	0,3	R	$\sqrt{3}$	1	0,17	∞
<i>PPR</i>	Répétabilité du positionnement de la sonde	(8.4.9)	0,04	N	1	1	0,02	∞
<i>SMO</i>	Décalage mécanique du capteur	(8.4.10)	0	N	1	1	0	∞
<i>PSR</i>	Résolution spatiale de la sonde	(8.4.11)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>FLD</i>	Influence de l'impédance de champ	(8.4.12)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>MED</i>	Dérive de mesure	(8.4.13)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>APN</i>	Bruit d'amplitude et de phase	(8.4.14)	0,03	N	1	1	0,03	∞
<i>TR</i>	Troncature de la zone de mesure	(8.4.15)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>DAQ</i>	Acquisition de données	(8.4.16)	0,03	N	1	1	0,02	∞
<i>SMP</i>	Echantillonnage	(8.4.17)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>REC</i>	Reconstruction de champ	(8.4.18)	0,6	R	$\sqrt{3}$	1	0,35	∞
<i>SNR</i>	Rapport signal sur bruit	(8.4.19)	0,04	N	1	1	0,2	
<i>TRA</i>	Transformation directe et inverse	(8.4.20)	0,5	N	1	1	0,29	∞
<i>SCA</i>	Mise à l'échelle de la densité de puissance	(8.4.21)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>SAV</i>	Moyennage spatial	(8.4.22)	0,1	R	$\sqrt{3}$	1	0,06	∞
<i>COM</i>	Combinaison d'expositions	(8.4.23)	0,2	R	$\sqrt{3}$	1	0,12	∞

Symbole	Source d'incertitude	Description	Inc. $\pm$ dB	Loi de probabilité	Div.	c_i	Incertitude type $\pm$ dB	v_i ou v_{eff}
Termes d'incertitude dépendant du DUT et des facteurs environnementaux								
<i>PC</i>	Couplage de la sonde avec le DUT	(8.5.1)	0	N	1	1	0	∞
<i>MOD</i>	Réponse en modulation	(8.5.2)	0,4	R	$\sqrt{3}$	1	0,23	∞
<i>IT</i>	Temps d'intégration	(8.5.3)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>RT</i>	Temps de réponse	(8.5.4)	0,1	R	$\sqrt{3}$	1	0,06	∞
<i>DH</i>	Influence du support de dispositif	(8.5.5)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>DA</i>	Alignement du DUT	(8.5.6)	0,04	R	$\sqrt{3}$	1	0,02	∞
<i>AC</i>	Conditions radiofréquences ambiantes	(8.5.7)	0,04	R	$\sqrt{3}$	1	0,02	∞
<i>TEM</i>	Température du laboratoire	(8.5.8)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>REF</i>	Réflexions dans le laboratoire	(8.5.9)	0,1	R	$\sqrt{3}$	1	0,06	∞
<i>MSI</i>	Immunité/réception secondaire	(8.5.10)	0	R	$\sqrt{3}$	1	0	∞
<i>DRI</i>	Dérive du DUT	(8.5.11)	0,1	R	$\sqrt{3}$	1	0,06	∞
	Incertitude type composée	(8.6)					0,85	
	Incertitude élargie (intervalle de confiance de 95 %)	(8.6)					1,70	
NOTE Toutes les valeurs ont été évaluées à l'aide de méthodes non statistiques (Méthode B des publications [18], [19]) dans lesquelles v_i peut être considéré comme étant infini. N – loi de probabilité normale; R – loi de probabilité rectangulaire								

9 Rapport de mesure

9.1 Généralités

Tous les résultats d'essai doivent être enregistrés dans un rapport de mesure, et ils doivent contenir toutes les informations nécessaires à l'interprétation des résultats de mesure de la densité de puissance.

Un rapport de mesure doit comporter au minimum les éléments répertoriés en 9.2 afin de démontrer la conformité aux exigences du présent document.

NOTE 1 Certaines informations relatives au fonctionnement du système de mesure peuvent être considérées comme exclusives et confidentielles. Ces informations peuvent être mises à disposition sous forme de documents confidentiels accompagnant un rapport de mesure.

NOTE 2 L'Annexe G fournit un exemple de rapport de mesure.

9.2 Éléments à enregistrer dans les rapports de mesure

Toutes les informations nécessaires à l'exécution d'essais, de calculs et de mesurages reproductibles dont les résultats respectent les limites d'étalonnage et d'incertitude exigées doivent être enregistrées. Les rapports de mesure doivent comprendre ce qui suit:

- a) une introduction générale:
 - 1) identification du laboratoire d'essai;
 - 2) identification du DUT, y compris les numéros de révision du matériel et du logiciel, le numéro de série, par exemple IMEI (*international mobile equipment identity*, identité internationale d'équipement mobile);
 - 3) exigences de conformité, par exemple normes d'essai, lignes directrices, recommandations, etc.;
 - 4) limites d'exposition applicables, par exemple ICNIRP [2], IEEE Std C95.1 [3];
 - 5) une liste de toutes les accréditations fournies par des organismes nationaux ou internationaux afin de procéder à des essais de conformité par rapport à ces normes. La date d'expiration doit être indiquée;
- b) un système de mesure:
 - 1) description des principaux composants du système de mesure, y compris la sonde, les appareils électroniques de lecture, le support de dispositif et tout autre composant pertinent. Justification et description du réglage des paramètres du système de mesure lorsque celui-ci a une incidence directe sur les résultats;
 - 2) pour la ou les sondes utilisées, inclure:
 - i) les dimensions;
 - ii) l'isotropie;
 - iii) les résolutions spatiales;
 - iv) la plage dynamique; et
 - v) l'erreur de linéarité;
 - 3) données d'étalonnage pour les composants pertinents;
 - 4) description des algorithmes de post-traitement;
 - 5) conditions environnementales (par exemple température);
 - 6) résultats de la vérification relative du système:
 - i) résultats de mesure pour chaque bande de fréquences;
 - ii) écart par rapport à la valeur cible de densité de puissance;
 - iii) description de la source de rayonnement;
 - 7) résultats de la vérification absolue du système (si nécessaire conformément à l'Annexe A):
 - i) résultats de mesure pour chaque bande de fréquences;
 - ii) écart par rapport à la valeur cible de densité de puissance;
 - iii) description de la source de rayonnement;
- c) des estimations d'incertitude pour la vérification relative du système, la vérification absolue du système, la validation du système:
 - 1) inclure les valeurs d'incertitude de mesure de l'Article 8 et de l'Annexe C;
 - 2) tout autre élément pertinent;
- d) les détails relatifs aux essais et au dispositif:
 - 1) description du facteur de forme du DUT, ainsi qu'une brève description de sa fonction prévue;
Le cas échéant, il convient de fournir des photographies externes et internes;
 - 2) description des positions et orientations soumises à l'essai, y compris des photographies et/ou des schémas (en angle large et en gros plan) représentant le positionnement du DUT par rapport à la surface d'évaluation;

- 3) description des antennes et accessoires disponibles et soumis à l'essai, y compris les batteries.
Au besoin, il convient d'inclure des représentations schématiques dont le niveau de détail représente les éléments fonctionnels pertinents pour l'antenne. Les détails des cartes de circuits imprimés ne sont pas nécessaires, à moins qu'ils ne se rapportent à l'antenne;
 - 4) description des modes de fonctionnement, niveaux de puissance et bandes de fréquences disponibles et soumis à l'essai;
 - 5) justification de toute réduction des essais (par exemple balayage rapide, modes opératoires, etc.);
 - 6) description et justification de l'approche choisie pour déterminer les cas d'exposition maximale parmi les configurations d'antenne (7.3.1, étape 4));
 - 7) résultats de tous les essais effectués (valeur de la $psPD$ pour chaque essai et représentation graphique des balayages grossiers par rapport au dispositif pour la valeur maximale de la densité de puissance de chaque mode de fonctionnement et détails relatifs à la mise à l'échelle des résultats;
 - 8) intégralité des paramètres et détails de configuration pertinents;
 - 9) informations relatives à la configuration utilisée pour la $psPD$, y compris la justification que cela représente l'exposition maximale;
 - 10) informations relatives à la combinaison d'exposition effectuée (7.5), le cas échéant;
- e) le rapport de mesure doit contenir les informations suivantes concernant la validation de la méthode de mesure de la densité de puissance:
- 1) description de la ou des procédures de validation;
 - 2) résultats des calculs, mesures et/ou autres évaluations effectués par le concepteur de la méthode afin de valider la méthode de mesure de la densité de puissance;
 - 3) analyses ou conditions supplémentaires imposées par le concepteur de la méthode et appliquées par l'utilisateur afin de satisfaire à la méthode de mesure de la densité de puissance, le cas échéant;
 - 4) description de la source de rayonnement et distribution de la densité de puissance pour chaque bande de fréquences;
 - 5) plage de fréquences de fonctionnement, modulations, configurations de fonctionnement du dispositif, conditions d'exposition et distributions de la densité de puissance pour chaque bande de fréquences spécifique à la méthode;
 - 6) incertitude de la densité de puissance;
- f) un récapitulatif du rapport:
- 1) bandes de fréquences et configurations;
 - 2) liste de toutes les bandes de fréquences et modulations soumises à l'essai;
 - 3) liste de toutes les configurations d'essai évaluées;
 - 4) valeurs tabulées de la densité de puissance pour les positions et bandes d'essai, les modes de fonctionnement et les configurations du dispositif;
 - 5) résultats tabulaires et graphiques de mesure de la $psPD$ la plus élevée pour chaque bande de fréquences et chaque modulation;
 - 6) résultats de tous les essais de densité de puissance effectués à la suite du 7.4, incluant la valeur de la $psPD$ pour chaque essai exigé et la représentation graphique des balayages par rapport au dispositif;
 - 7) valeurs liées aux conditions de la Formule (14) (voir 7.3.2) jusqu'à la Formule (27) (voir 7.5.2);
 - 8) référence aux limites d'exposition et à une déclaration de conformité, ou bien limites d'exposition et déclaration de conformité;

- g) lorsque des informations exclusives ont été utilisées pour déterminer les configurations d'essai, incluses ou exclues, cela doit être mentionné. Il convient d'inclure une brève description des informations utilisées, par exemple un tableau des phases et des amplitudes pertinentes pour les antennes à filtrage spatial;
- h) le rapport des capteurs de proximité:
lorsque des capteurs de proximité se sont déclenchés au cours des essais, il convient de suivre les exigences de rapport applicables indiquées en 9.2 de l'IEC/IEEE 62209-1528:2020;
- i) le rapport du moyennage temporel.
Lorsque le moyennage temporel est mis en œuvre, il convient de suivre les exigences de rapport applicables indiquées en 9.2 de l'IEC/IEEE 62209-1528:2020.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC/IEEE 63195-1:2022

Annexe A (normative)

Vérification du système de mesure et essais de validation du système

A.1 Vue d'ensemble

L'objet de l'Annexe A est de spécifier les procédures de vérification relative du système, de vérification absolue du système et de validation du système qui permettent aux utilisateurs et aux tiers de vérifier les performances du système en ce qui concerne la densité de puissance en appliquant des protocoles cohérents. Les objectifs de ces trois procédures sont les suivants:

- a) la vérification relative du système est une méthode d'essai rapide et fiable qui peut être appliquée de façon régulière pour vérifier que le système de densité de puissance est opérationnel, sans aucune défaillance de composants du système, et qu'il n'a pas dégénéré depuis la dernière vérification absolue du système ou validation du système. L'objectif est ici de s'assurer que le système de densité de puissance est acceptable pour les essais aux fréquences de fonctionnement du DUT. Cet essai exige une antenne de vérification du système (par exemple une antenne cornet pyramidale, comme celles décrites à l'Annexe B, ou toute autre antenne proposée par le fabricant du système);
- b) la vérification absolue du système est une méthode d'essai rapide et fiable permettant au laboratoire d'essai de s'assurer que le système de densité de puissance fournit une exactitude absolue pour une source spécifique conforme aux spécifications. Elle peut être effectuée après l'installation du système afin de vérifier que les performances ne se sont pas dégradées lors de l'expédition ou de l'installation dans le laboratoire d'essai. Cet essai exige une antenne rayonnante possédant une valeur cible absolue traçable. Cet essai ne remplace pas la validation du système;

NOTE 1 La vérification absolue du système et la vérification relative du système suivent la même procédure si la vérification relative du système utilise une antenne avec une valeur cible absolue traçable.

- c) la validation du système démontre l'exactitude du système et de ses composants par rapport aux spécifications relatives à l'usage prévu. La validation du système constitue une assurance que le système fournit des résultats conformes à l'incertitude spécifiée lorsque tous les composants fonctionnent selon leurs spécifications. Cet essai s'effectue au niveau du système et est habituellement réalisé par le fabricant du système, mais il est spécifié avec suffisamment de précision pour être réalisé par l'utilisateur du système. La validation du système doit être effectuée sur un système étalonné, chaque fois que des modifications matérielles et/ou logicielles susceptibles d'avoir une incidence sur l'évaluation de la densité de puissance sont apportées (par exemple, modifications de la ou des sondes, des algorithmes de reconstruction ou de l'électronique de lecture, et étalonnage des composants du système). Le montage d'essai est constitué des antennes de validation du système décrites à l'Annexe B, chacune possédant un certificat d'étalonnage valide.

NOTE 2 Lorsque la validation du système effectuée dans le laboratoire d'essai satisfait aux critères d'acceptation, le laboratoire d'essai peut établir la valeur de référence de la $psPD$ de l'antenne de vérification du système utilisée pour la vérification relative du système en mesurant l'antenne relative immédiatement après la validation du système. La $psPD$ mesurée devient la nouvelle valeur de référence.

NOTE 3 Si le système a été validé par le fabricant avant l'expédition, il est nécessaire d'effectuer une vérification absolue du système. Lorsque la vérification absolue du système satisfait aux critères d'acceptation, le laboratoire d'essai peut établir la valeur de référence de la $psPD$ de l'antenne de vérification du système utilisée pour la vérification relative du système en mesurant l'antenne de vérification relative du système immédiatement après avoir effectué la vérification absolue du système.

NOTE 4 Dans le présent document, la validation est effectuée sur une surface d'évaluation plane. Les méthodes de validation sur des surfaces d'évaluation incurvées (SAM modifié, par exemple) ne sont pas traitées dans le présent document et il sera envisagé qu'elles fassent l'objet d'un amendement.

A.2 Normalisation en fonction de la puissance totale rayonnée

A.2.1 Généralités

La densité de puissance est normalisée en fonction de la puissance totale rayonnée (TRP). Aux fréquences d'ondes millimétriques, les pertes ohmiques de l'antenne peuvent être importantes et doivent être prises en compte. Pour cela, soit la TRP est mesurée directement (voir A.2.3), soit la puissance acceptée est mesurée et multipliée par le rendement (voir A.2.2). Les mesures spécifiées dans la présente Annexe A exigent une puissance mesurée avec précision et stable pour l'antenne. Deux options permettant de déterminer la TRP sont décrites en A.2.2 et A.2.3. L'option 1 consiste à déterminer la puissance totale rayonnée à partir de la puissance acceptée en tenant compte des pertes ohmiques de l'antenne. L'option 2 consiste à mesurer directement la TRP.

Si le générateur, l'amplificateur et l'antenne de la source de vérification absolue du système constituent une seule unité et que la TRP possède un étalonnage traçable, l'utilisateur n'a pas besoin d'exécuter l'option 1 ou l'option 2; toutefois, la procédure décrite à l'Article A.5 doit être documentée par le fabricant de l'antenne.

A.2.2 Option 1: Mesure de la puissance acceptée

A.2.2.1 Procédure

La TRP peut être déterminée en mesurant et en surveillant la puissance incidente et réfléchie à l'entrée RF de l'antenne de référence. Les pertes ohmiques doivent également être déterminées, comme cela est indiqué à la fin du présent paragraphe.

La Figure A.1 représente un montage d'essai recommandé. Le système comprend un générateur de signaux, un multiplicateur de fréquence, un amplificateur (Amp.), des atténuateurs de 3 dB à 20 dB (Att), un coupleur bidirectionnel, des appareils de mesure de la puissance (PM, *Power Meters*), une charge adaptée, un court-circuit de précision, des câbles ou des guides d'ondes, des connecteurs et des adaptateurs. Un filtre passe-bande est nécessaire si un résidu harmonique plus important est susceptible de fausser les résultats.

- Connecter l'équipement, comme cela est représenté à la Figure A.2. Un mesureur de puissance PM1 et un atténuateur Att1 sont raccordés à l'extrémité du câble ou du guide d'ondes. Connecter une charge à l'accès couplé inverse du coupleur directif. S'assurer que la puissance mesurée est stable dans le temps. Régler la puissance de sortie du générateur de signaux jusqu'à ce que la puissance incidente P_f à PM1 soit au niveau de puissance souhaité, puis mesurer la puissance couplée incidente P_{fc} à PM2.
- Ensuite, connecter l'équipement, comme cela est représenté à la Figure A.3, avec la terminaison de court-circuit raccordée à l'extrémité du câble. Régler la puissance du générateur de signaux de sorte que la puissance couplée incidente à PM2 soit égale à la puissance couplée incidente mesurée précédemment, P_{fc} , et relever la puissance couplée inverse en court-circuit P_{rcs} à PM1.
- Connecter l'équipement, comme cela est représenté à la Figure A.4, avec l'antenne de référence (positionnée à l'emplacement d'essai) raccordée à l'extrémité du câble. Régler la puissance du générateur de signaux de sorte que la puissance couplée incidente à PM2 soit égale à la puissance couplée incidente mesurée précédemment, P_{fc} , et relever la puissance couplée inverse P_{rc} à PM1.

L'affaiblissement de réflexion de l'antenne de référence, (RL), exprimé en dB, équivaut à $P_{rcs} - P_{rc}$.

- Calculer la puissance acceptée (c'est-à-dire la puissance reçue par l'antenne de référence) en soustrayant l'affaiblissement de réflexion (RL) de la puissance incidente P_f . La perte d'insertion doit également être soustraite s'il existe une ligne de transmission (câble ou guide d'ondes) entre le point de référence et l'antenne. La perte d'insertion peut être mesurée à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel.

- e) La TRP est calculée en multipliant la puissance acceptée par le rendement (voir 3.5.9). Le rendement tient compte des pertes ohmiques dans l'antenne. Le rendement peut être mesuré sur une plage d'essai d'antenne, ou il peut être consulté dans la documentation du fabricant de l'antenne. Si le fabricant de l'antenne documente le rendement, il doit également documenter l'incertitude de cette valeur, u_{power} , à utiliser à l'Article A.3, à l'Article A.4 et à l'Article A.5.

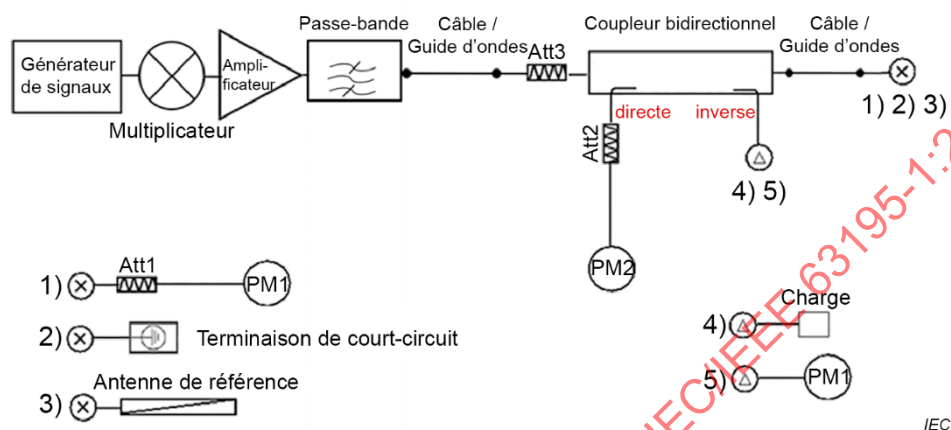


Figure A.1 – Montage de mesure de la puissance acceptée recommandé pour la vérification relative du système, la vérification absolue du système et la validation du système

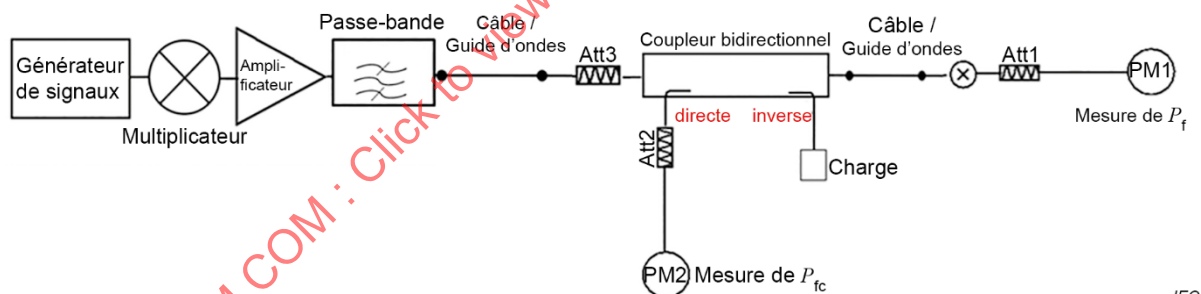


Figure A.2 – Configuration de l'équipement pour la mesure de la puissance incidente P_f et de la puissance couplée incidente P_{fc}

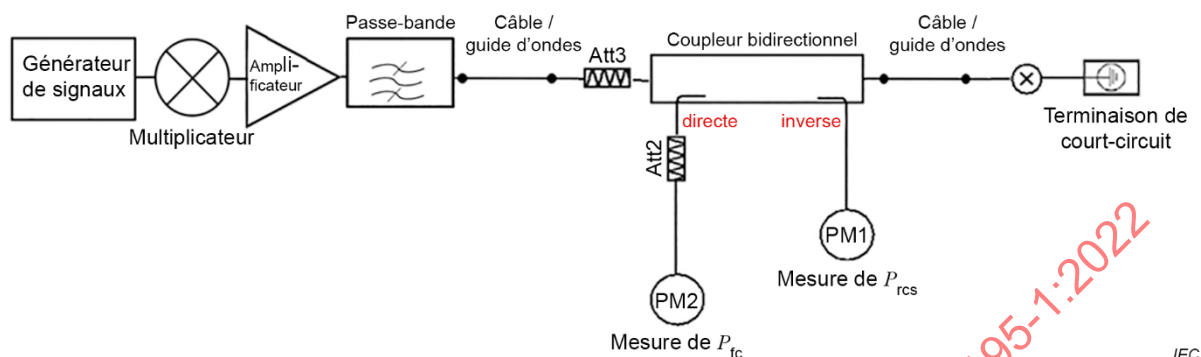


Figure A.3 – Configuration de l'équipement pour la mesure de la puissance couplée inverse en court-circuit P_{rcs}

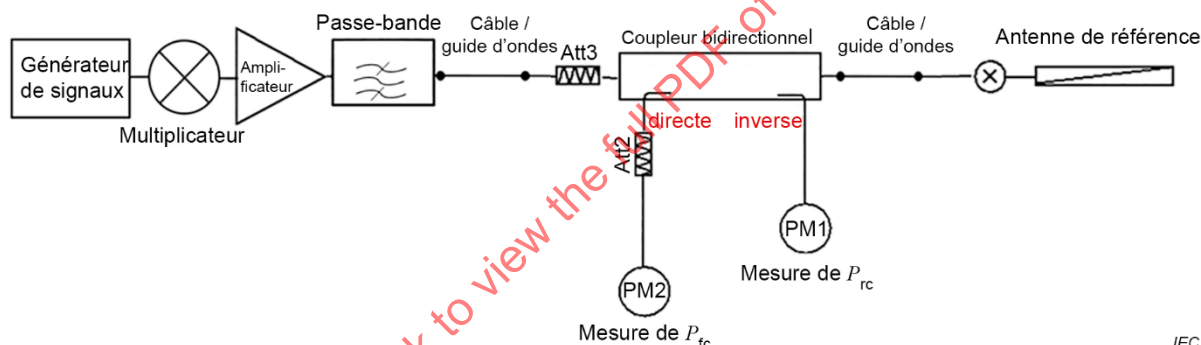


Figure A.4 – Configuration de l'équipement pour la mesure de la puissance avec l'antenne de référence

A.2.2.2 Evaluation de l'incertitude

La Figure A.2 décrit le montage de mesure de la puissance utilisé pour déterminer la puissance acceptée (P_{acc}) à l'extrémité du câble, utilisé dans l'option 1. P_f est mesurée par PM1 et liée à la puissance couplée incidente (P_{fc}) mesurée par PM2. L'affaiblissement de réflexion de l'antenne de référence (RL) est déterminé au moyen du montage de mesure de la puissance représenté à la Figure A.3, où la puissance couplée inverse en court-circuit (P_{rcs}) est mesurée à l'accès de puissance inverse du coupleur directif par PM1. Lorsque l'antenne de référence est connectée au câble, comme cela est représenté à la Figure A.4, la puissance couplée inverse (P_{rc}) est mesurée par PM1. Les contributions à l'incertitude pour P_f , P_{fc} , P_{rc} et P_{rcs} sont les suivantes:

a) les contributeurs à $u_{p_{acc}}$ sont: $u_1(PM1)$, $u_1(\text{câble})$, $u_1(Att1)$, $u_1(\Gamma_{GE}, \Gamma_e, RL)$, où

- $u_1(PM1)$ dépend de l'exactitude de l'instrument, de la linéarité du capteur, du bruit, du réglage du zéro, de la dérive du zéro, du facteur d'étalonnage, de l'exactitude de la puissance de référence, de la désadaptation de la puissance de référence;
- $u_1(\text{câble})$ est l'écart maximal résultant du mouvement du câble (distribution rectangulaire);

$u_1(\text{atténuateur})$ est l'incertitude relative à la valeur de l'atténuateur;

$u_1(\Gamma_{GE}, \Gamma_e, RL)$ est l'incertitude relative à la réflexion de la source équivalente, le coefficient de réflexion du capteur de puissance PM1 avec l'atténuateur Att1 et le coefficient de réflexion de l'antenne de référence;

NOTE L'incertitude de l'atténuateur peut être exclue si le mesureur de puissance PM1 et l'atténuateur Att1 sont étalonnés ensemble.

b) les contributeurs à P_{fc} sont: aucune incertitude, car la sortie du générateur de signaux est réglée pour maintenir une valeur constante exacte pour P_f à la sortie du câble (plan de référence);

c) les contributeurs à P_{rc}, P_{rcs} sont: $u_2(\text{PM1})$, $2 \times u_1(\text{câble})$, où

$u_2(\text{PM1})$ dépend de l'exactitude de l'instrument, de la linéarité du capteur, du bruit, du réglage du zéro, de la dérive du zéro, du facteur d'étalonnage, de l'exactitude de la puissance de référence, de la désadaptation de la puissance de référence;

d) incertitude par approximation: $u_1(F)$; ce contributeur est inclus si la méthode de mesure à l'aide d'un coupleur bidirectionnel est utilisée (la désadaptation est comprise dans cette incertitude) sans VNA;

e) incertitude de désadaptation $u_1(\Gamma_{GE}, \Gamma_e, RL)$; ce contributeur est inclus si une méthode de mesure à l'aide d'un coupleur directif et d'un VNA (pour la mesure de RL) est utilisée, où

Γ_{GE} est la réflexion de la source équivalente (Formule (A.1)) lorsqu'un coupleur directif est utilisé:

$$\Gamma_{GE} = \frac{S_{32} + S_{21}}{S_{31}} - S_{22} \quad (\text{A.1})$$

Les paramètres S ($S_{31}, S_{21}, S_{32}, S_{22}$) du coupleur directif à 4 accès (représenté à la Figure A.5) peuvent être obtenus à partir des spécifications du fabricant, ou mesurés à l'aide d'un VNA;

f) $u_1(\Gamma_{GE}, \Gamma_e, RL)$ est exprimé dans la Formule (A.2):

$$u_1(\Gamma_{GE}, \Gamma_e, RL) = \sqrt{2} \times \Gamma_{GE} \times \sqrt{|\Gamma_e|^2 + |RL|^2} \quad (\text{A.2})$$

où:

Γ_e est le coefficient de réflexion du capteur de puissance PM1 avec l'atténuateur Att1;

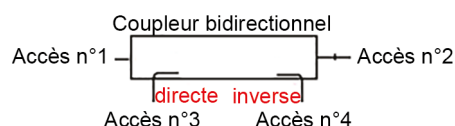
Γ_{GE} est la réflexion de la source équivalente;

RL est le coefficient de réflexion de l'antenne de référence;

g) u_{p_acc} est exprimée selon la Formule (A.3):

$$u_{p_acc} = \sqrt{u_1(\text{PM1})^2 + u_1(\text{attenuator})^2 + u_1(\text{cable})^2 + u_2(\text{PM1})^2 + u_1(\Gamma_{GE}, \Gamma_e, RL)^2} \quad (\text{A.3})$$

Un exemple d'incertitude de mesure de la puissance est indiqué dans le Tableau A.1.



IEC

Figure A.5 – Numérotation des accès pour les mesures du paramètre S du coupleur directif

Tableau A.1 – Exemple d'incertitude de mesure de la puissance

Symbole	Source d'incertitude X_i	Loi de probabilité a	Incertitude	Diviseur q^a	$u(X_i)$	c_i	$u_c(y) = c \times u(X_i)$	Degré de liberté (v_i)
Contributeurs à P_f								
$u_{\text{abs}}(\text{PM1})$	Incertitude de la mesure absolue avec PM1	N		1		1		
$u(\text{atténuateur})$	Incertitude de S_{21} pour Att1	N		1		1		
$u(\text{câble ou guide d'ondes})$	Incertitude par flexion du câble ou perte du guide d'ondes et désadaptation	R		$\sqrt{3}$		1		
Contributeurs à P_{TC} et P_{TCs}								
$u_{\text{rel}}(\text{PM1})$	Incertitude de la mesure relative avec PM1	N		1		1		
$u(\Gamma_{\text{GE}}, \Gamma_e, RL)$	Incertitude relative à l'erreur de désadaptation	U		$\sqrt{2}$		1		
Incertitude totale de mesure de la puissance acceptée ($k = 1$)								Degrés de liberté effectifs (v_{eff})
Incertitude élargie de mesure de la puissance acceptée ($k = 2$)								Degrés de liberté effectifs (v_{eff})

N – loi de probabilité normale; R – loi de probabilité rectangulaire; U – loi de probabilité en U

^a Les lois de probabilité et les diviseurs sont choisis de manière à représenter au mieux les connaissances disponibles sur les grandeurs concernées.

A.2.3 Option 2: Mesure de la puissance totale rayonnée

La mesure de la puissance totale rayonnée (TRP) est une alternative à l'option 1 (voir A.2.2).

La TRP est l'intégrale du diagramme de puissance sur l'ensemble de la sphère de rayonnement. Elle est déterminée à partir des valeurs de *PIRE* échantillonnées en une série d'emplacements dans le plan d'élévation et dans le plan d'azimut d'une antenne de référence. De telles mesures de la TRP impliquent généralement une incertitude assez importante (voir par exemple CTIA [21]).

Afin de réduire l'incertitude, la mesure de la TRP peut être effectuée à n'importe quelle distance (d_{TRP}) dans le champ lointain de l'antenne, à condition que la distribution 3D relative du champ rayonné à la distance de mesure soit connue de manière très précise avec une incertitude connue (par exemple par simulations). La TRP est déterminée à l'aide des étapes suivantes:

- simulation de la TRP de l'antenne $P_{\text{TRP, sim}}$;
- simulation de la distribution du champ (E ou H) à une distance d_{TRP} pour une zone plus grande que $4\lambda^2$ et détermination de la $psPD_{\text{sim}}$ moyennée sur 4 cm^2 à la d_{TRP} ;
- détermination du facteur d'échelle s_{TRP} entre les distributions de champ mesuré et simulé à l'aide d'un algorithme des moindres carrés, le champ devant en toutes circonstances dévier de moins de 0,5 dB lorsqu'il est normalisé en fonction du champ maximal:

$$P_{\text{TRP, exp}} = s_{\text{TRP}} \times P_{\text{TRP, sim}}$$

Un bilan d'incertitudes relatif au diagramme de rayonnement doit être déterminé et fourni. L'incertitude ne peut pas être meilleure que la somme quadratique de la simulation, de la validation de la source et des mesures.

A.3 Vérification relative du système

A.3.1 Objet

La vérification relative du système permet de vérifier la répétabilité d'un système de mesure de la densité de puissance avant de procéder aux essais de conformité. Elle ne constitue pas une validation de toutes les spécifications du système. La vérification relative du système détecte les erreurs de mesure inacceptables ou les incertitudes du système, telles que:

- les défaillances de composants du système de mesure;
- la dérive de mesure;
- les erreurs de l'opérateur dans le montage de mesure ou les paramètres logiciels;
- d'autres conditions défavorables possibles dans la configuration du système et l'environnement d'essai, par exemple perturbations RF, variation de température.

La vérification relative du système est une mesure de la $psPD$ moyennée dans la zone sur 1 cm^2 et/ou 4 cm^2 avec une antenne de vérification du système à une distance donnée (par exemple une antenne de l'Annexe B ou une antenne proposée par le fabricant du système). Les composants du système, les réglages logiciels et autres paramètres du système doivent être les mêmes que ceux utilisés pour les essais de conformité. Les réglages du système appliqués (réglage de la grille, reconstruction et/ou transformation directe et inverse, etc.) et l'étalonnage utilisé pour la vérification relative du système doivent être valides pour la fréquence d'essai de conformité. Par exemple, si l'étalonnage de la sonde est valide sur une large fréquence, il suffit d'effectuer la vérification relative du système à une fréquence comprise dans la bande d'étalonnage valide qui inclut également la fréquence d'essai de conformité.

La vérification relative du système doit être effectuée dans un délai d'une semaine avant l'évaluation de la densité de puissance et sur le même système de mesure de la densité de puissance que celui utilisé pour l'évaluation du DUT. Les valeurs cibles de 1 cm² et/ou 4 cm² sont valides pour une distance d'évaluation spécifique et peuvent être des valeurs étalonnées ou des valeurs de référence pour l'antenne spécifique du montage. Les valeurs de référence sont extraites d'un certificat d'étalonnage ou sont mesurées par le laboratoire immédiatement après la vérification absolue du système.

A.3.2 Antenne et conditions d'essai

La surface d'évaluation doit être irradiée à l'aide d'une antenne de vérification du système conçue pour la fréquence de fonctionnement du DUT exigée, en émettant dans les limites de $\pm 15\%$ de la fréquence de fonctionnement du DUT. Les antennes de référence utilisées pour la vérification relative du système peuvent être l'une des antennes décrites à l'Annexe B, ou bien une autre antenne spécifiée par le laboratoire ou le fabricant du système.

L'antenne de vérification du système doit être positionnée de manière à pouvoir évaluer la densité de puissance sur une surface où les valeurs cibles sont indiquées, habituellement parallèle à la surface d'évaluation. La distance entre la surface d'évaluation et l'antenne, s , doit être fixée avec précision pour s'assurer que la répétabilité ne dépasse pas l'incertitude d'alignement du DUT (8.5.6).

L'affaiblissement de réflexion de l'antenne doit être mesuré au moins une fois par an à l'aide d'un analyseur de réseau ou du montage de la Figure A.1, afin d'assurer une faible incertitude de mesure de la densité de puissance due à la réflexion de puissance. Etant donné que les antennes de vérification du système sont fréquemment utilisées, elles peuvent être endommagées (par exemple, distorsion mécanique ou dégradation du connecteur d'entrée de l'antenne); l'affaiblissement de réflexion de l'antenne de vérification du système doit être vérifié de façon périodique par l'utilisateur afin d'éviter une mauvaise interprétation des résultats de vérification relative du système, conformément au B.5.6.

A.3.3 Procédure

La procédure de vérification relative du système est la suivante:

- mesurer la $psPD$ de l'antenne de vérification du système à l'aide de la procédure de mesure décrite à l'Article 7;
- normaliser la $psPD$ à la TRP de 0 dBm mesurée selon l'Article A.2, option 1 ou option 2;
- comparer la $psPD$ normalisée à la valeur cible;
- appliquer les critères d'acceptation décrits en A.3.4.

A.3.4 Critères d'acceptation

Avant de commencer l'essai de densité de puissance du DUT dans quelque configuration que ce soit, les critères d'acceptation doivent être remplis. La vérification relative du système est réussie si la condition a) ou b) est remplie:

- toutes les différences absolues entre les valeurs mesurées $psPD_{meas}$ et les valeurs cibles $psPD_{tgt}$, avec des valeurs de $psPD$ moyennées sur 1 cm² et/ou 4 cm² doivent se situer dans les limites de l'incertitude composée u_c du système de mesure et de l'antenne source, selon la Formule (A.4) si l'incertitude est exprimée en décibel, ou selon la Formule (A.5) si l'incertitude est exprimée en pourcentage, ainsi que selon la Formule (A.6).

$$\Delta psPD_{tgt} = \left| 10 \times \lg \left(\frac{psPD_{meas}}{psPD_{tgt}} \right) \right| < \min(2 \times |u_c|, 2 \text{ dB}) \quad (\text{A.4})$$

ou

$$\Delta psPD_{tgt} = \left| \frac{psPD_{meas} - psPD_{tgt}}{psPD_{tgt}} \right| < \min(2 \times |u_c|, 58\%) \quad (A.5)$$

$$u_c = \sqrt{u_{antenna_cal}^2 + u_{power}^2 + u_{meas}^2} \quad (A.6)$$

où:

- $psPD_{tgt}$ est la valeur cible, obtenue en mesurant l'antenne source de manière répétée, normalisée à une TRP de 0 dBm;
- $u_{antenna_cal}$ est l'incertitude type ($k = 1$) de la $psPD$ du modèle d'antenne;
- u_{power} est l'incertitude type ($k = 1$) de la TRP mesurée (voir Article A.2);
- u_{meas} est l'incertitude type ($k = 1$) de la mesure de $psPD$ (étalonnage de la sonde, électronique et positionnement).

L'écart est limité à 2 dB (58 %) pour assurer une bonne reproductibilité des résultats du système de mesure et de l'antenne. Si le critère de 2 dB n'est pas rempli, la mesure qui correspond aux points qui ont échoué doit être répétée au moins trois fois afin d'exclure les valeurs de mesure aberrantes. Si l'écart-type des trois mesures dépasse la répétabilité du système de mesure, la défaillance peut provenir de la configuration RF, de l'antenne de vérification du système ou du système de mesure. Si l'écart-type des trois mesures se situe dans les limites de répétabilité du système de mesure, il existe une erreur systématique qui peut provenir d'une dérive de l'étalonnage du système ou d'une configuration RF incorrecte;

- b) toutes les différences relatives entre les valeurs mesurées $psPD_{meas}$ et les valeurs de référence avec la même configuration de l'équipement et la même antenne rayonnée, $psPD_{ref}$, doivent se situer dans les limites de l'incertitude composée de l'incertitude relative composée $u_{relative}$ selon la Formule (A.7), la Formule (A.8) ou la Formule (A.9).

$$\Delta psPD_{ref} = \left| 10 \times \lg \left(\frac{psPD_{meas}}{psPD_{ref}} \right) \right| < \min(2 \times |u_{relative}|, 0,42 \text{ dB}, 2 \text{ dB} - \Delta psPD_{tgt}) \quad (A.7)$$

ou

$$\Delta psPD_{ref} = \left| \frac{psPD_{meas} - psPD_{ref}}{psPD_{ref}} \right| < \min(2 \times |u_{relative}|, 10\%, 58\% - \Delta psPD_{tgt}) \quad (A.8)$$

$$u_{relative} = \sqrt{u_{power_relative}^2 + u_{meas_relative}^2} \quad (A.9)$$

où:

- $u_{power_relative}$ est l'incertitude type ($k = 1$), en décibels, pour la répétabilité de la TRP mesurée (voir Article A.2);
- $u_{meas_relative}$ est l'incertitude type ($k = 1$), en décibels, pour la répétabilité du système de mesure (étalonnage de la sonde, électronique et positionnement);
- $2 \times u_{relative}$ ne doit pas dépasser 0,42 dB (10 %) ou $2 \text{ dB} - \Delta psPD_{tgt}$, si cette valeur est plus faible, la valeur de $\Delta psPD_{tgt}$ la plus récente étant utilisée (voir A.3.4 a) ou A.4.4). Le critère $2 \times u_{relative} \leq 2 \text{ dB} - \Delta psPD_{tgt}$ est établi de façon que la vérification absolue du système ne dépasse pas 2 dB.

Si le système de mesure utilise des mesures directes en champ proche (voir E.2.4), les critères de vérification relative du système, selon la Formule (A.7) ou la Formule (A.8), peuvent être appliqués au champ E ou au champ H plutôt qu'à la densité de puissance, en remplaçant respectivement $psPD_{meas}$ et $psPD_{ref}$ par la valeur mesurée et la valeur de référence du champ E maximal moyenné dans l'espace ou du champ H maximal moyenné dans l'espace, en fonction du type de sonde. Cela permet à un système qui utilise deux sondes (une sonde de champ E et une sonde de champ H) d'appliquer la vérification relative du système à chaque sonde séparément. La méthodologie et l'incertitude du calcul du champ E maximal moyenné dans l'espace ou du champ H maximal moyenné dans l'espace doivent être documentées.

La valeur de référence, $psPD_{ref}$, doit être déterminée pour la combinaison d'instrumentation spécifique (version du logiciel, sonde, électronique d'acquisition, antenne, fréquence, etc.) utilisée par le laboratoire. Si un laboratoire dispose de plusieurs sondes et/ou de plusieurs électroniques d'acquisition, celui-ci ne peut utiliser une valeur de référence unique, $psPD_{ref}$, que s'il démontre que cette valeur de référence ne varie pas de plus de $\pm 2\%$ entre les différentes sondes et/ou électroniques d'acquisition utilisées dans le laboratoire.

A.4 Vérification absolue du système

A.4.1 Objet

La vérification absolue du système consiste à vérifier que l'équipement sur le site de l'utilisateur a été installé correctement et que les performances de l'équipement ne se sont pas dégradées depuis la validation du système. Cette procédure est plus simple que la validation du système et peut ainsi être facilement exécutée par le laboratoire d'essai.

La vérification absolue du système est une mesure de la $psPD$ sur 1 cm^2 et/ou 4 cm^2 avec une antenne rayonnante à une fréquence et une distance données. La vérification absolue du système doit être effectuée pour toutes les bandes de fréquences soumises à l'essai. Les composants du système, les réglages logiciels et autres paramètres du système doivent être les mêmes que ceux utilisés pour les essais de conformité.

A.4.2 Antenne et conditions d'essai

La surface d'évaluation doit être irradiée à l'aide d'une antenne décrite à l'Annexe B. L'antenne doit avoir une valeur cible absolue déduite des simulations numériques et vérifiée par des mesures. L'antenne doit posséder un certificat d'étalonnage valide.

L'antenne doit être positionnée de manière à pouvoir évaluer la densité de puissance sur un plan où les valeurs cibles sont indiquées, habituellement parallèle au plan d'évaluation. La distance entre la surface d'évaluation et l'antenne, s , doit être fixée avec précision pour s'assurer que la répétabilité ne dépasse pas l'incertitude d'alignement du DUT (8.5.6).

A.4.3 Procédure

La procédure de vérification absolue du système est la suivante:

- mesurer la $psPD$ de l'antenne de vérification du système à l'aide de la procédure de mesure décrite à l'Article 7;
- normaliser la $psPD$ à la TRP de 0 dBm qui a été étalonnée ou qui est mesurée selon l'Article A.2, option 1 ou option 2;
- comparer la $psPD$ normalisée à la valeur cible;
- appliquer les critères d'acceptation décrits en A.4.4.

A.4.4 Critères d'acceptation

La vérification absolue du système aboutit si toutes les différences absolues entre les valeurs mesurées, $psPD_{meas}$, et les valeurs cibles, $psPD_{tgt}$, de $psPD$ se situent dans les limites de l'incertitude composée u_{comb} du système de mesure et de l'antenne étalonnée, selon la Formule (A.10) si l'incertitude est exprimée en décibels, ou selon la Formule (A.11) si l'incertitude est exprimée en pourcentage, ainsi que selon la Formule (A.12).

$$\Delta psPD_{tgt} = \left| 10 \times \lg \left(\frac{psPD_{meas}}{psPD_{tgt}} \right) \right| < \min(2 \times |u_c|, 2 \text{ dB}) \quad (\text{A.10})$$

ou

$$\Delta psPD_{tgt} = \left| \frac{psPD_{meas} - psPD_{tgt}}{psPD_{tgt}} \right| < \min(2 \times |u_c|, 58 \%) \quad (\text{A.11})$$

$$u_c = \sqrt{u_{antenna_cal}^2 + u_{power}^2 + u_{meas}^2} \quad (\text{A.12})$$

où:

$psPD_{tgt}$	est la valeur cible absolue, déduite des simulations numériques, normalisée à la <i>TRP</i> de 0 dBm;
$u_{antenna_cal}$	est l'incertitude type ($k = 1$) de la $psPD$ du modèle d'antenne comprenant à la fois la modélisation numérique et la modélisation physique de l'antenne étalonnée;
u_{power}	est l'incertitude type ($k = 1$) de la <i>TRP</i> mesurée (voir Article A.2);
u_{meas}	est l'incertitude type ($k = 1$) de la mesure de $psPD$ (étalonnage de la sonde, électronique et positionnement).

L'écart $\Delta psPD_{tgt}$ est limité à 2 dB (58 %) pour faciliter une bonne reproductibilité de mesure.

A.5 Validation du système

A.5.1 Objet

La validation du système est une procédure qui utilise des antennes spécifiques pour valider qu'un système de mesure fonctionne dans l'incertitude de mesure indiquée. En d'autres termes, elle permet de vérifier que l'exactitude est suffisante pour l'usage prévu conformément au présent document. Cette configuration utilise une surface d'évaluation plane et toutes les antennes de validation du système spécifiées à l'Annexe B. Ainsi, il convient que ce processus de validation inclue tous les contributeurs d'incertitude à la validation du système déterminés à l'Article 8. La validation du système doit être effectuée sur un système étalonné chaque fois que des modifications matérielles et/ou logicielles susceptibles d'avoir une incidence sur l'évaluation de la densité de puissance sont apportées (par exemple, modifications de la ou des sondes, des algorithmes de reconstruction ou des appareils électroniques ou des sondes de lecture, et étalonnage des composants du système). La validation du système peut être effectuée par le fabricant du système ou par l'utilisateur du système.

A.5.2 Procédure

La validation du système est une mesure de la $psPD$ sur 1 cm^2 et/ou 4 cm^2 dans une plage de fréquences limitée en utilisant toutes les antennes de validation (Annexe B). Il convient de réaliser la mesure de la $psPD$ conformément aux procédures décrites à l'Article 7. Les résultats sont comparés aux valeurs cibles numériques qui sont normalisées à la TRP (voir Tableau B.1 à l'Article B.2, Tableau B.5 en B.3.2, et Tableau B.8 en B.4.2).

La procédure de validation du système comprend plusieurs étapes permettant de valider différents aspects de l'incertitude du système de mesure (voir le modèle d'incertitude de mesure de l'Article 8). Par conséquent, la validation du système doit satisfaire aux exigences suivantes:

- a) la validation du système doit couvrir la plage de fréquences utilisée par le système pour l'essai de conformité;
- b) le système de mesure doit être étalonné conformément à l'Annexe C;
- c) chaque fréquence d'essai doit avoir un étalonnage valide;
- d) chaque antenne de validation de l'Annexe B, à l'exception de celles qui se trouvent en dehors de la plage de mesure spécifiée du système de mesure, doit être mesurée pour toutes les surfaces d'évaluation spécifiées à l'Annexe B (2 mm, 5 mm, 10 mm et 50 mm). Ces mesures sont réalisées à un niveau de puissance donnée à l'aide d'un signal CW;
- e) au moins deux des antennes de validation de l'Annexe B doivent être mesurées à des niveaux de puissance fournissant des valeurs de $psPD$ qui couvrent la plage dynamique du système de mesure. La puissance doit être modifiée par paliers de 6 dB, du niveau minimal au niveau maximal, sur la plage dynamique. Un signal CW est utilisé. Une surface d'évaluation est utilisée pour chaque antenne;
- f) une antenne de l'Annexe B doit être soumise à l'essai au moyen de plusieurs signaux de communication. Le jeu de signaux de communication doit présenter différents rapports puissance maximale/puissance moyenne, différentes largeurs de bande occupées et différents types de modulations afin de valider que le système mesure avec précision tout type de signal soumis à l'essai. Des exemples de modulations sont donnés en A.5.3. Une surface d'évaluation est utilisée pour l'essai;
- g) les antennes et l'équipement de mesure RF utilisés pour la validation doivent constituer un jeu d'équipements indépendant de ceux utilisés pour l'étalonnage de la sonde (Annexe C). L'utilisation de différents jeux d'équipements permet d'éviter la transmission de tout biais d'étalonnage à la validation.

A.5.3 Validation de la réponse en modulation

Les modulations répertoriées dans le Tableau A.2 doivent être utilisées pour valider le système de mesure à l'aide des antennes cornets pyramidaux spécifiées à l'Article B.2. Des modulations supplémentaires peuvent également être soumises à l'essai afin de vérifier que l'étalonnage de la sonde (Annexe C) est valide pour les types de signaux modulés utilisés par le DUT. Les limitations de la réponse en modulation et de la fréquence doivent être clairement indiquées par le fabricant du système.

Tableau A.2 – Signaux de communication pour l'essai de réponse en modulation

Groupe	N°	Type de groupe	Type de modulation	Schéma d'accès	Description
G1	M1	Référence non modulée – PAPR faible	CW	N/A	Porteuse non modulée
	M7	Référence non modulée – PAPR élevé	CW	N/A	Signal impulsionnel avec une période de 10 ms et un cycle de service de 10 % (1 ms MARCHÉ, 9 ms ARRÊT)
G2	M2	PAPR élevé	MDP-4	CP-OFDM	5G NR (CP-OFDM, 1 RB, 100 MHz, MDP-4, 60 kHz)
	M3	PAPR élevé	16-QAM	CP-OFDM	5G NR (CP-OFDM, 100 % RB (32 RB), 50 MHz, 16QAM, 120 kHz)
	M4	PAPR élevé	64-QAM	CP-OFDM	5G NR (CP-OFDM, 50 % RB (33 RB), 100 MHz, 64QAM, 120 kHz)
G3	M5	PAPR faible	MDP-4	DFT-s-OFDM	5G NR (DFT-s-OFDM, 1 RB, 50 MHz, MDP-4, 120 kHz)
	M6	PAPR faible	MDP-4	DFT-s-OFDM	5G NR (DFT-s-OFDM, 100 % RB (64 RB), 100 MHz, QPSK, 120 kHz)
G4	M8	Bande élargie	MDP-4	DFT-s-OFDM	5G NR (DFT-s-OFDM, 100% RB (256 RB) 400 MHz, QPSK, 120 kHz)
NOTE 1 Ces configurations sont destinées au mode sans signalisation, sans réduction de puissance maximale appliquée et avec des RB centrés au milieu du canal.					
NOTE 2 G2 et G3 se fondent sur la définition Canaux de référence indiquée dans la 3GPP TS 38.521-2 [22].					

A.5.4 Critères d'acceptation

Les critères de validation ont été spécifiés pour satisfaire aux objectifs spécifiés en A.4.1, c'est-à-dire pour vérifier que le système de mesure de la densité de puissance fonctionne dans sa plage d'utilisation spécifiée et dans l'incertitude correspondante déterminée à l'Article 8.

La validation du système est réussie si toutes les différences absolues entre les valeurs mesurées, $psPD_{meas}$, et les valeurs cibles, $psPD_{tgt}$, de $psPD$ se situent dans les limites de l'incertitude composée élargie u_{comb} du système de mesure et de l'antenne étalonnée, selon la Formule (A.13) si l'incertitude est exprimée en décibels, ou selon la Formule (A.14) si l'incertitude est exprimée en pourcentage, ainsi que selon la Formule (A.15).

$$\left| 10 \times \lg \left(\frac{psPD_{meas}}{psPD_{tgt}} \right) \right| < \min(2 \times |u_c|, 2 \text{ dB}) \quad (\text{A.13})$$

ou

$$\left| \frac{psPD_{meas} - psPD_{tgt}}{psPD_{tgt}} \right| < \min(2 \times |u_c|, 58 \%) \quad (\text{A.14})$$

$$u_c = \sqrt{u_{\text{antenna_cal}}^2 + u_{\text{power}}^2 + u_{\text{meas}}^2} \quad (\text{A.15})$$

où:

$psPD_{tgt}$	est la valeur cible absolue (1 cm^2 et/ou 4 cm^2), déduite des simulations numériques, normalisée à la TRP de 0 dBm;
$u_{\text{antenna_cal}}$	est l'incertitude type ($k = 1$), comprenant à la fois la modélisation numérique et la modélisation physique de l'antenne étalonnée;
u_{power}	est l'incertitude type ($k = 1$) de la TRP mesurée (voir Article A.2);
u_{meas}	est l'incertitude type ($k = 1$) du système de mesure (étalonnage de la sonde, électronique et positionnement).

L'écart est limité à 2 dB (58 %) pour assurer une bonne reproductibilité des résultats du système de mesure et de l'antenne.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC/IEEE 63195-1:2022