

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 2: Computational 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 2: Procédure de calcul



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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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 2: Computational 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 2: Procédure de calcul**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 17.220.20

ISBN 978-2-8322-0184-8

**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.....	6
INTRODUCTION.....	8
1 Scope.....	9
2 Normative references	9
3 Terms and definitions	10
3.1 Exposure metrics and parameters.....	10
3.2 Spatial, physical, and geometrical parameters associated with exposure metrics.....	11
3.3 Test device technical operating and antenna parameters	13
3.4 Computational parameters	13
3.5 Uncertainty parameters.....	14
4 Symbols and abbreviated terms.....	14
4.1 Symbols.....	14
4.1.1 Physical quantities.....	14
4.1.2 Constants	15
4.2 Abbreviated terms.....	15
5 Overview and application of this document.....	16
5.1 Overview of the numerical evaluation.....	16
5.2 Application of this document	17
5.3 Stipulations.....	18
6 Requirements on the numerical software	18
7 Model development and validation.....	19
7.1 General.....	19
7.2 Development of the numerical model of the DUT.....	19
7.3 Power normalization	20
7.4 Requirements on the experimental test equipment for model validation.....	22
7.4.1 General	22
7.4.2 Ambient conditions and device holder.....	23
7.4.3 Power measurement.....	23
7.5 Testing configurations for the validation of the DUT model.....	24
7.5.1 General	24
7.5.2 Tests to be performed.....	24
7.5.3 Determining the validity of the DUT model	25
7.5.4 Test reduction for additional DUTs.....	25
8 Power density computation and averaging.....	26
8.1 Evaluation surface	26
8.2 Tests to be performed and DUT configurations	26
8.2.1 General	26
8.2.2 Devices with a single radiating element or with multiple elements that do not operate simultaneously	27
8.2.3 Devices with antenna arrays or sub-arrays	27
8.2.4 Devices with multiple antennas or multiple transmitters	28
8.3 Considerations on the evaluation surface and dimensions of the computational domain	29
8.4 Averaging of power density on an evaluation surface	29
8.4.1 General	29
8.4.2 Construction of the averaging area on an evaluation surface	30

8.5	Computation of sPD by integration of the Poynting vector.....	31
8.5.1	General	31
8.5.2	Surface-normal propagation-direction power density into the evaluation surface, sPD_{n+}	31
8.5.3	Total propagating power density into the evaluation surface, sPD_{tot+}	32
8.5.4	Total power density directed into the phantom considering near-field exposure, sPD_{mod+}	32
8.6	Software	33
9	Uncertainty evaluation	33
9.1	General.....	33
9.2	Uncertainty of the sPD and of the $mpsPD$ due to the computational parameters	33
9.2.1	Uncertainty contributions due to the computational parameters	33
9.2.2	Mesh resolution	34
9.2.3	Absorbing boundary conditions	35
9.2.4	Power budget	35
9.2.5	Model truncation	35
9.2.6	Convergence	35
9.2.7	Dielectric properties.....	36
9.2.8	Lossy conductors.....	36
9.3	Uncertainty contribution of the computational representation of the DUT model	36
9.4	Uncertainty of the maximum exposure evaluation	37
9.5	Uncertainty budget.....	38
10	Reporting	39
Annex A (normative)	Code verification	41
A.1	General.....	41
A.2	Interpolation and superposition of vector field components	41
A.3	Computation of the far-field pattern and the radiated power	43
A.4	Implementation of lossy conductors	43
A.5	Implementation of anisotropic dielectrics.....	46
A.6	Computation of the sPD and $psPD$	47
A.6.1	General	47
A.6.2	Planar surfaces	49
A.6.3	Non-planar surfaces	50
A.7	Implementation of the field extrapolation according to the surface equivalence principle	52
Annex B (informative)	Experimental evaluation of the radiated power	53
B.1	General.....	53
B.2	Direct conducted power measurements.....	53
B.3	Radiated power measurement methods	54
B.4	Information provided by the DUT.....	54
Annex C (normative)	Maximum-exposure evaluation techniques	55
C.1	General.....	55
C.2	Evaluation of EM fields radiated by each antenna element.....	55
C.3	Evaluation of the $mpsPD$ by superposition of individual EM fields	56
C.3.1	General	56
C.3.2	Maximization over the entire codebook by exhaustive search	56
C.3.3	Optimization with fixed total conducted power.....	56

C.3.4	Optimization with fixed power at each port.....	56
Annex D (informative)	Examples of the implementation of power density averaging algorithms.....	58
D.1	Example for the evaluation of the $psPD$ on a planar surface	58
D.1.1	General	58
D.1.2	Evaluation of the $psPD$ by direct construction of the averaging area.....	58
D.1.3	Example for the efficient evaluation of the $psPD$ using an equidistant mesh on the evaluation surface	59
D.2	Example for the evaluation of the $psPD$ on a non-planar surface	60
Annex E (informative)	File format for exchange of field data	62
Annex F (informative)	Rationales of the methods applied in IEC/IEEE 63195-1 and this document.....	64
F.1	Frequency range.....	64
F.2	Computation of sPD	64
F.2.1	Application of the Poynting vector for computation of incident power density.....	64
F.2.2	Averaging area	65
Annex G (informative)	Square averaging area on non-planar evaluation surfaces	66
G.1	General.....	66
G.2	Example implementation for the evaluation of the $psPD$ on a non-planar surface using square-shaped averaging area.....	66
Annex H (informative)	Validation of the maximum-exposure evaluation techniques	67
H.1	General.....	67
H.2	Validation of the exhaustive search.....	67
H.2.1	Validation of the exhaustive search	67
H.2.2	Validation using reconstruction method	67
H.2.3	Validation of optimization with fixed total conducted power or with fixed power at each port.....	67
H.2.4	Validation of the maximum-exposure evaluation of measurement results	67
H.3	Example validation source for maximum-exposure evaluation validation	68
H.3.1	Description.....	68
H.3.2	Positioning.....	70
H.3.3	Nominal codebook, uncertainty and conducted power P_R	71
H.3.4	Target values.....	71
Annex I (normative)	Supplemental files and their checksums	73
Bibliography		74
Figure 1	– Overview of the numerical power density evaluation procedure.....	17
Figure 2	– Power reference planes	22
Figure 3	– Example for configurations of radiating elements as different antenna sub-arrays on the same DUT	27
Figure 4	– Flow chart for the evaluation of power density for DUTs with antenna arrays or sub-arrays as described in 8.2.3	28
Figure 5	– Example of the construction of the averaging area within a sphere with fixed radius according to 8.4	31
Figure A.1	– Configuration of three $\lambda/2$ dipoles, D_1 , D_2 , and D_3 , for the evaluation of the interpolation and superposition of the electric field and magnetic field components.....	42
Figure A.2	– R320 waveguide	45

Figure A.3 – Cross section of the R320 waveguide showing the locations of the E_y components to be recorded.....	46
Figure A.4 – $S_i(x,y)$ computed with Formula (A.4) for the six parameter sets of Table A.6 normalized to their maxima	49
Figure A.5 – Cross sections of the symmetric quarters of the testing geometries (SAR Stars) for the benchmarking of the power density averaging algorithm.....	51
Figure A.6 – Areas for the computation of the sPD on a cone of the SAR Star.....	51
Figure D.1 – Rotated averaging area on the discretized evaluation surface (base mesh)	60
Figure D.2 – Reduction of the area of triangles that are partially included in the averaging sphere	61
Figure H.1 – Main dimensions of patch array stencil	69
Figure H.2 – Main dimensions of the validation device, including polypropylene casing	70
Figure H.3 – Validation device with SAM head in the tilt position	70
Figure H.4 – Validation device with SAM head in the touch position.....	71
Table 1 – Budget of the uncertainty contributions of the computational algorithm for the validation setup or testing setup	34
Table 2 – Budget of the uncertainty of the developed model of the DUT	37
Table 3 – Computational uncertainty budget	38
Table A.1 – Interpolation and superposition of vector field components; maximum permissible deviation from the reference results is 10 %	42
Table A.2 – Computation of P_R ; maximum permissible deviation from the reference results is 10 % for the radiated power and for the electric field amplitude of the far-field pattern	43
Table A.3 – Minimum fine and coarse mesh step for used method	46
Table A.4 – Results of the evaluation of the computational dispersion characteristics	46
Table A.5 – Results of the evaluation of the representation of anisotropic dielectrics	47
Table A.6 – Parameters for the incident power density distribution of Formula (A.4)	48
Table B.1 – Comparison of the experimental methods for the evaluation of the radiated power	53
Table H.1 – Main dimensions for the patch array stencil	68
Table H.2 – Main dimensions of the validation device	68
Table H.3 – Target values for validation device with the nominal codebook.....	72
Table H.4 – Target values for validation device with infinite codebook	72

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 2: Computational 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 63195-2 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 (ICES) 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 that are required for the code verification according to Annex A. Download links and checksums for these files can be found in Annex I.

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

Draft	Report on voting
106/564/FDIS	106/569/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 a method to evaluate the human exposure from wireless devices using computational methods. This document was developed to provide procedures for the numerical modelling and evaluation of such wireless devices operating close to the head, held in the hand or in front of the face, mounted on the body or embedded in garments. It applies to individual transmitters as well as to transmitters operating simultaneously with other transmitters within a product. The choice of technique, i.e. FDTD or FEM, is optional but can be influenced by the application. The advantages of computational procedures include the capability to provide repeatable, non-intrusive methods for determining exposure in or near an object and without the need for expensive hardware equipment. Device categories covered include but are not limited to mobile telephones, radio transmitters in personal computers, desktop and laptop devices, and multi-band and multi-antenna devices. This document specifies:

- requirements on the numerical software (Clause 5);
- model development and validation (Clause 7);
- power density computation and averaging (Clause 8);
- uncertainty evaluation (Clause 9);
- reporting requirements (Clause 10).

To develop this document, IEC Technical Committee 106 (TC 106) and IEEE International Committee on Electromagnetic Safety (ICES), Technical Committee 34 (TC 34) Subcommittee 1 (SC 1) formed Joint Working Group 11 (JWG 11) on computational methods to assess the power density of human exposure to radio frequency fields from wireless devices in close proximity to the head and body.

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

1 Scope

This document specifies computational procedures for conservative and reproducible computations of power density (PD) incident to a human head or body due to radio-frequency (RF) electromagnetic field (EMF) transmitting devices. The computational procedures described are finite-difference time-domain (FDTD) and finite element methods (FEM), which are computational techniques that can be used to determine electromagnetic quantities by solving Maxwell's equations within a specified computational uncertainty. The procedures specified here apply to exposure evaluations for a significant majority of the population during the use of hand-held and body-worn RF transmitting devices. The methods apply to devices that can feature single or multiple transmitters or antennas, and that can be operated with their radiating part or parts at distances up to 200 mm from a human head or body.

This document can be employed to determine conformity with any applicable maximum PD requirements of different types of RF transmitting devices used in close proximity to the head and body, including those 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 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.

The procedures of this document do not apply to PD evaluation of electromagnetic fields emitted or altered by devices or objects intended to be implanted in the body.

NOTE For the evaluation of the combined exposure from simultaneous transmitters operating on frequencies below 6 GHz, the relevant standards for SAR computation are IEC/IEEE 62704-1:2017 and IEC/IEEE 62704-4:2020.

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 62704-1:2017, *Determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human body from wireless communications devices, 30 MHz to 6 GHz – Part 1: General requirements for using the finite difference time-domain (FDTD) method for SAR calculations*

IEC/IEEE 62704-4:2020, *Determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human body from wireless communications devices, 30 MHz to 6 GHz – Part 4: General requirements for using the finite element method for SAR calculations*

IEC/IEEE 63195-1:2021¹, *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 1: Measurement procedure*

IEEE Std 145, *IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas*

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 compute 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 8.5. See also rationales provided in Annex F for the PD specifications of 8.5.

Note 2 to entry: The formula used to compute 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 determined 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 the *sPD* (3.1.2) values on the evaluation surface (3.2.2)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.

3.1.4**maximized peak spatial-average power density***mpsPD**psPD* (3.1.3) of the excitation vector (3.3.5) that maximizes its value**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**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 computing *sPD* (3.1.2)Note 1 to entry: On a planar evaluation surface, *sPD* is computed 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.

3.2.2

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 (3.1.6) of the exposure.

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

3.2.3

near-field

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

Note 1 to entry: See also 3.2.5 and 3.2.4 for definitions of reactive near-field and radiative near-field, respectively.

3.2.4

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.

3.2.5

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 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.]

3.2.6

far-field

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

[SOURCE: IEC 60050-712:1992, 712-02-02, modified – In the definition, the distance to geometrical centre of the antenna has been clarified, and a phrase on the ratio of the electric and magnetic components has been added.]

3.3 Test device technical operating and antenna parameters

3.3.1

channel

RF 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 is subject to national frequency allocations. For the purposes of this document, PD computations are performed at specific channels; for example, the high, middle, and low channels of the transmission band.

3.3.2

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.

3.3.3

array

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

3.3.4

codebook

set of all possible excitation vectors

3.3.5

excitation vector

vector of all phasors that represent the input signal to an antenna array or sub-array

Note 1 to entry: The entries of a codebook are excitation vectors.

3.3.6

module

sub-assembly

self-contained RF transceiver that only needs power and communication to its host through a connector, ball grid arrays or pins and is designed to be incorporated into a final product

3.4 Computational parameters

3.4.1

computational domain

set of all spatial locations at which the electric field or magnetic field is computed by a mathematical equation or a computational algorithm

3.4.2

lumped source

source with an inner impedance which is applied to an electric field component on an edge of the computational mesh

3.4.3

perfect electric conductor

PEC

material with infinite electrical conductivity which does not dissipate any energy

3.4.4

surface equivalence principle

theorem that states that sources within a closed region can be replaced by substitute sources on the region surface giving rise to the same field outside the enclosed regions

Note 1 to entry: Details can be found in [1].

3.5 Uncertainty parameters

3.5.1

uncertainty

confidence range of the evaluated value

3.5.2

standard uncertainty

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

3.5.3

combined uncertainty

estimated standard deviation of the measurement or computation 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

3.5.4

expanded uncertainty

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

3.5.5

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
a	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
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

Symbol	Quantity	Unit	Dimensions
μ	permeability	henry per metre	H/m
sPD	spatial-average power density	watt per square metre	W/m ²
sPD_{n+}	spatial-average power density, surface normal, directed into the phantom	watt per square metre	W/m ²
sPD_{tot+}	spatial-average power density, total, directed into the phantom	watt per square metre	W/m ²
sPD_{mod+}	spatial-average power density, modulus	watt per square metre	W/m ²
$psPD$	peak spatial-average power density	watt per square metre	W/m ²
$mpsPD$	maximized peak spatial-average power density	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: $T (^{\circ}\text{C}) = T (\text{K}) - 273,15$.

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 Ω
ε_0	permittivity of free space	$8,854 \times 10^{-12}$ F/m
μ_0	permeability of free space	$4\pi \times 10^{-7}$ H/m

4.2 Abbreviated terms

ABC	absorbing boundary condition
CAD	computer aided design
DFT	discrete Fourier transform
DUT	device under test
EIRP	equivalent isotropically radiated power
FDTD	finite-difference time-domain
FEM	finite element method
HDF5	hierarchical data format Version 5
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IF	intermediate frequency
MEE	maximum exposure evaluation (technique)
P_A	power available from the generator
P_M	power to matched transmission line
P_O	power accepted by the antenna

P_R	power radiated by the antenna
PD	power density
PEC	perfect electric conductor
RF	radio frequency
SAM	specific anthropomorphic mannequin
SAR	specific absorption rate
SI	système international
STL	stereolithography

5 Overview and application of this document

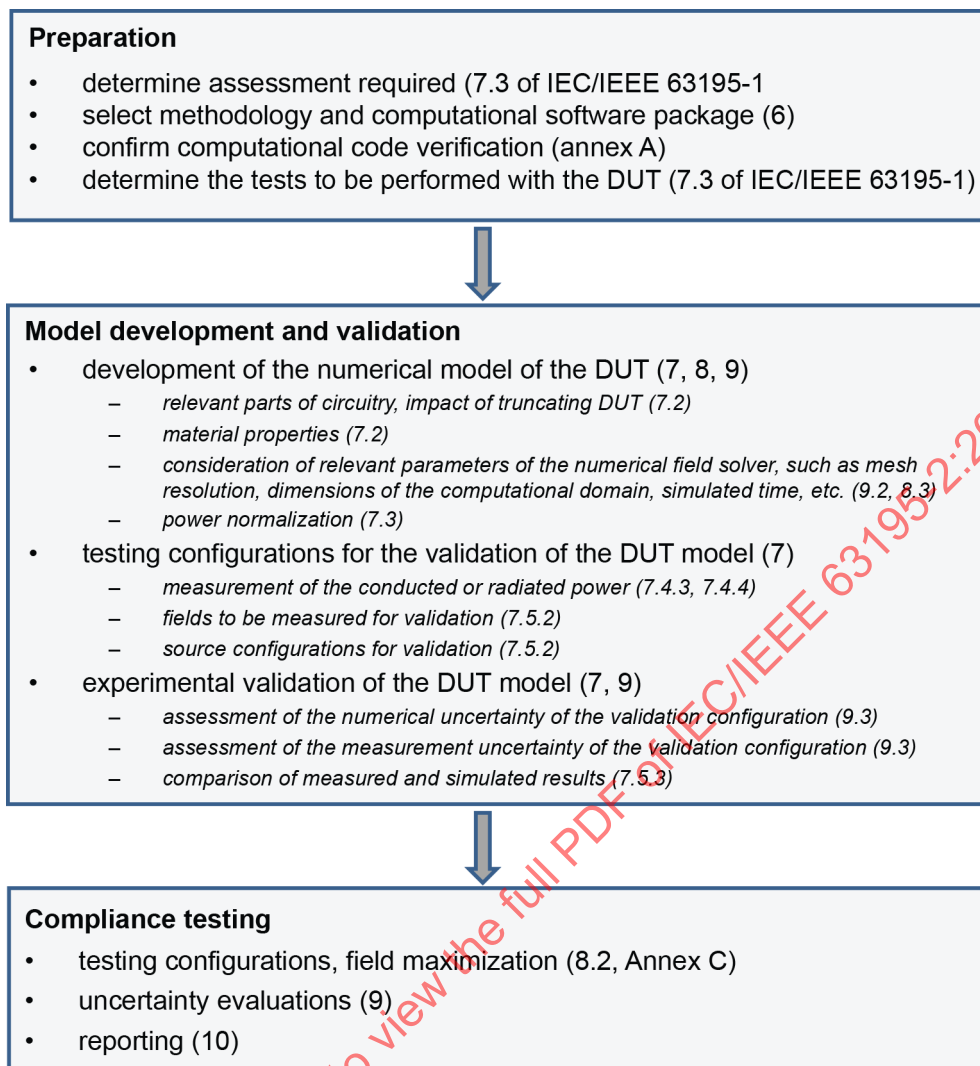
5.1 Overview of the numerical evaluation

This document specifies procedures for the evaluation of the spatial-average electromagnetic power density of wireless communication devices operating at frequencies from 6 GHz to 300 GHz using computational methods applying the finite-difference time-domain (FDTD) technique or the finite element method (FEM). The evaluation of the power density is carried out in different steps, which are the following:

- a) determination of the evaluation required;
- b) selection of the methodology and of an applicable, verified computational software package;
- c) definition of the tests to be performed;
- d) development and validation of the numerical DUT model;
- e) evaluation of the power density;
- f) quantification of the uncertainty.

Figure 1 gives a high-level overview of these steps and references the subclauses that describe them in detail.

Clause 6 to Clause 10 present the procedures that are required for the numerical power density evaluation of a DUT. The evaluation shall be carried out with software that is verified for the correct technical implementation of this document. The complementary procedures that describe the verification of the numerical computation software and that are mainly relevant for the software manufacturers are given in the annexes. Software may alternatively be verified by the user of this document, e.g. as part of the power density evaluation of a DUT, according to these methods.



IEC

Figure 1 – Overview of the numerical power density evaluation procedure

5.2 Application of this document

This document and IEC/IEEE 63195-1 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 computational procedures, and IEC/IEEE 63195-1 specifies measurement 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 [2]², both IEC/IEEE 63195-1 and this document were developed in a comparatively short time period of two years. In parallel, the ICNIRP 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 incident and absorbed/epithelial power density or incident power density, respectively, averaged over a square area of 1 cm² or 4 cm².

² Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

IEC/IEEE 63195-1 contains all relevant specifications for the application of measurement procedures for conformity evaluation. While it can be applied independently from this document, it refers to the post processing methods for power density averaging and maximization of the incident power density that are common to both IEC/IEEE 63195-1 and this document, but are specified only in this document. Likewise, computational conformity evaluation is described in this document. For validations of numerical modelling results by measurements, the methods of IEC/IEEE 63195-1 are required.

5.3 Stipulations

Due to the constraints on the time available for the development of IEC/IEEE 63195-1 and this document, practical options needed to be found regarding the interpretation of the new exposure guidelines for the evaluation of the conformity with the new limits. These concern the construction of the averaging area and the computation of the spatial-average power density on this averaging area. Regarding the computation 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 [2] and to consider exposure conditions other than perpendicular incidence in the far-field. Annex F discusses the options and their rationales.

These options do not impair the applicability of the methods specified in IEC/IEEE 63195-1 and this document for the conformity evaluation with the reference levels specified in the exposure guidelines.

6 Requirements on the numerical software

This Clause 6 describes the characteristics and features of the numerical software to be used for the computation of the peak spatial-average power density (p_{sPD}) that are required for both the application of the software according to Clause 7, Clause 8, and Clause 9, and for the verification of its correct implementation according to Annex A. The following characteristics and features of the numerical software are required:

- a) Maxwell's equations solver based on FDTD or FEM in the frequency domain according to the definitions in IEC/IEEE 62704-1:2017 and IEC/IEEE 62704-4:2020, respectively;
- b) modelling environment and mesh generator for the representation of the electrically relevant parts of the DUT and of nearby objects for the rendering of its electric and magnetic fields at specifiable geometrical resolution limited only by the available computer memory;
- c) representation of isotropic perfect electric conductors;
- d) representation of isotropic dielectric materials with relative permittivities $\epsilon_r \geq 1$ and electric conductivities $\sigma \geq 0$;
- e) representation of uniaxial anisotropic dielectric materials with relative permittivities $\epsilon_r \geq 1$ and electric conductivities $\sigma \geq 0$;
- f) isotropic electric losses $\sigma < \infty$ in metallic conductors that are represented as thin sheets or filaments;
- g) interpolation of the frequency domain computation results to specifiable points within the computational domain;
- h) superposition of the computed E -vector and H -vector fields in the frequency domain of a specifiable number of computation results using specifiable complex scaling factors, e.g. for the evaluation of the beam steering of phased array antennas;
- i) computation of the dissipated power considering losses in dielectrics and in metallic conductors for a specifiable number of superimposed computation results on specifiable meshes;
- j) superposition of the far-field patterns of a specifiable number of computation results using specifiable complex scaling factors including the evaluation of P_R , e.g. for the evaluation of the beam steering of phased array antennas;

- k) computation of the *sPD* and *psPD* according to 8.5;
- l) computation of the *mpSPD* according to Annex C.

Extensions of FDTD or FEM that include the required characteristics and features a) through l) but provide additional features may be applied provided that they have been fully validated and that their implementation has been verified. These alternative methods shall provide at least the same accuracy as FDTD or FEM methods specified in IEC/IEEE 62704-1:2017 and IEC/IEEE 62704-4:2020. The finite integration technique (FIT) in the time domain can be regarded as an extension of FDTD in this context.

NOTE 1 IEC/IEEE 62704-1:2017 and IEC/IEEE 62704-4:2020 specify procedures to determine the peak spatial specific absorption rate in the human body using computational methods.

NOTE 2 IEC/IEEE 62704-1:2017 and IEC/IEEE 62704-4:2020 cover the application of FDTD and FEM in the frequency range from 30 MHz to 6 GHz. In addition to the code verification described in the two standards, there is a large body of scientific literature that validates the two numerical methods for exposure evaluation in this frequency range. For the extended frequency range up to 300 GHz that is covered in this document, there is little literature available that demonstrates the validity of the two methods. Application examples for this frequency range can be found, e.g. in [3]. In general, FDTD and FEM can be considered as intrinsically frequency independent. If the discretization of the computational domain and the geometry to be computed appropriately consider the conventional discretization criteria, the methods can be expected to work with the same accuracy as in the frequency ranges for which experimental validation has been done. Appropriate discretization of the computational domain and the geometry is asserted by the uncertainty evaluation (Clause 9).

The numerical software may compute electric and magnetic fields outside the computational domain using the surface equivalence principle if all sources and parts of the DUT are contained in the computational domain (8.3). If the software implements field computation using the surface equivalence principle, it shall be validated according to Clause A.7.

7 Model development and validation

7.1 General

In experimental power density evaluation, the unmodified DUT is evaluated according to a standardized protocol using measurement equipment with known uncertainty contributions. Numerical computations of a wireless device are more flexible with respect to the tests to be performed or the modelling of real-world operation conditions, or may even be necessary where experimental evaluation is overly cumbersome or even technically impossible. An essential requirement on the application of numerical methods for power density evaluation with respect to exposure limits is the validation of the numerical model of the DUT using experimental methods. The experimental validation may be carried out in a configuration that is technically simpler than the full evaluations for DUT according to IEC/IEEE 63195-1:2021. Hence, an appropriately validated DUT model can be evaluated numerically in a large number of tests to be performed thereby reducing the overall effort to demonstrate conformity. The requirements and recommendations on DUT modelling and validation, testing equipment and tests to be performed are specified in 7.2, 7.3, 7.4, and 7.5. The evaluation of the uncertainty of results obtained with the applied methods is described in Clause 9.

7.2 Development of the numerical model of the DUT

The development of a numerical model of a DUT for power density evaluation requires a large number of decisions on the level of detail to be represented in the computational domain. Because of the large number of modern devices and the high level of technical innovations in the field, generalized guidelines for the model development cannot be given. In the following, the steps for the development of the DUT model are described.

- a) The model of the DUT should be based on its original CAD data in order to avoid errors or inaccuracies when modelling dielectrics or conductors.

NOTE 1 The development of a numerical model of the DUT based on its CAD data can require individual simplifications or extensions of the available data, such that specific requirements on the CAD data and on the data-importing procedure cannot be made here. The verification of the numerical model according to 7.5 is regarded as an adequate demonstration that the model agrees with the original DUT for the purpose of this document.

- b) All conducting parts shall be integrated into the CAD model because even conductors that are far away from the antenna may couple parasitically and act as radiators. Particular considerations apply if device truncation is used (see step g) and 9.2.5).
- c) The dielectric properties of all major parts in the environment of radiators and RF transmission lines should be modelled correctly considering frequency dependency. References for the dielectric properties should be documented as far as available.
- d) Anisotropic dielectrics should be included in the DUT model if they are relevant for its RF characteristics.
- e) Metallic losses should be included in the DUT model if they are relevant for its RF characteristics or for power normalization.
- f) Modelling of the feeding or matching networks is required if the fields of these networks are not confined in a closed environment. Otherwise, lumped sources can be placed directly at the antenna feed-point. Computations of handheld devices with integrated multiband antennas have shown that it is often difficult to obtain good agreement of the computed feed-point impedance with measurement data. Nevertheless, the normalization of the exposure evaluation results to P_R yields satisfactory accuracy [4].
- g) The computer system should have sufficient computational resources (working memory, processors, storage) to compute the entire DUT model and the evaluation surface. Under some circumstances, a DUT model may be truncated. However, the reactive fields of the model should not be truncated. This shall be demonstrated by comparison of the input reflection coefficients of the antenna or the elements of the antenna array or by identification of the volume storing the reactive energy of the DUT. The latter may be identified by comparison of the ratio of the local electric field and magnetic field amplitudes to the free space wave impedance. The impact of truncating the model shall be indicated in the uncertainty budget.
- h) Guidance on the dimensions of the computational domain can be found in 8.3. The evaluation surface need not be included in the computational domain as the fields on it may be computed using the surface equivalence principle (8.3).
- i) The testing report (Clause 10) shall summarize how these recommendations are considered for the development of the DUT model.

NOTE 2 Additional guidance on the development of the DUT model can be found in 5.4 of IEC/IEEE 62704-3:2017 [5]. Although IEC/IEEE 62704-3:2017 refers to the computation of handheld devices operating at frequencies up to 6 GHz using the FDTD method, 5.4 of IEC/IEEE 62704-3:2017 can be regarded as general enough to provide guidance beyond its original scope, i.e. for devices operating at the frequency range considered in this document and on importing CAD models into computational software using FEM.

7.3 Power normalization

Figure 2 shows the different power reference planes in a DUT and its computational model. The available power at the source P_A is fed to the antenna via a transmission line and/or a matching circuit leading to losses (P_M) due to impedance mismatching and dissipation of the available power in the circuitry resulting in the output power P_O that is accepted by the antenna. Additional losses can occur in the antenna itself, such that the power that is emitted by the DUT is referred to as the radiated power P_R . All power related quantities are defined in IEEE Std 145.

Typically, the computational model of a DUT has a simplified feeding or matching network, which can lead to

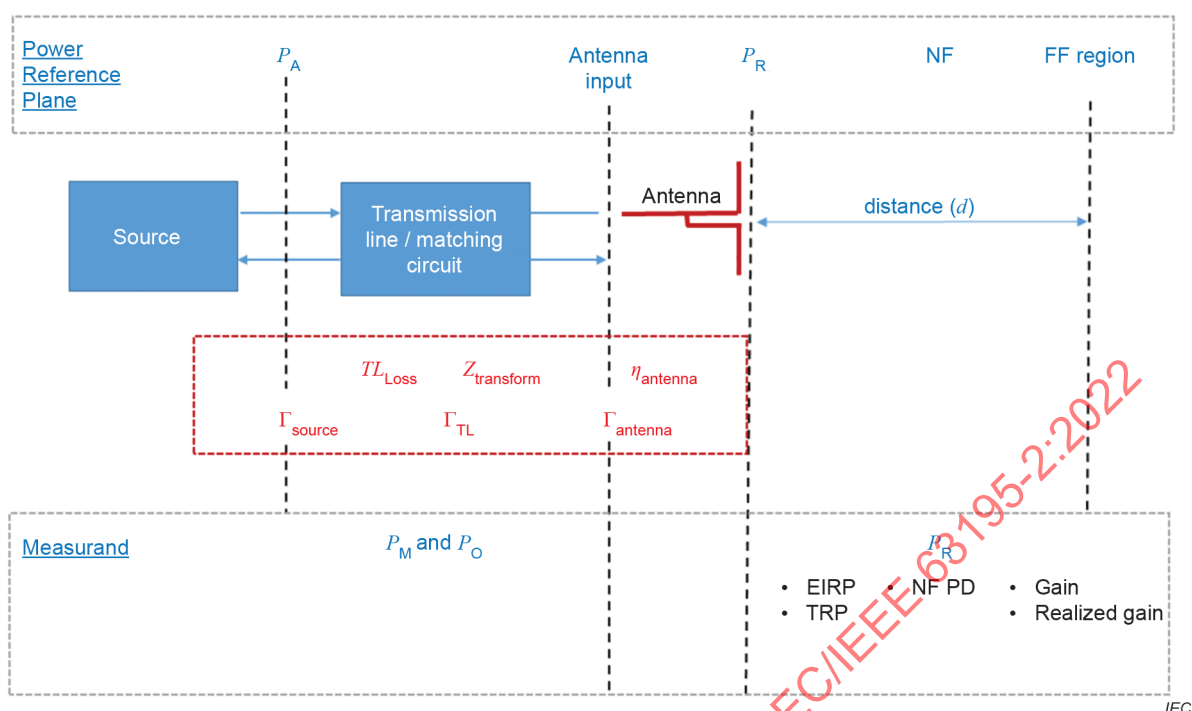
- a) specific deviations in the feed-point impedance of the antenna(s),
- b) inaccurate representation of the cross coupling, or
- c) differences in the dielectric or conducted transmission losses.

While these quantities are always available in the computational model, they need not necessarily be an exact representation of those of the actual DUT. Moreover, the feeding or antenna ports of the DUT may not be accessible for conducted power measurements. In the general case, only the EIRP or the P_R of the DUT can be evaluated experimentally to quantify P_R (Annex B).

NOTE Many documents refer to P_R as total radiated power or TRP.

All quantities (Poynting vector, PD , sPD , $psPD$ and $mpsPD$) shall be normalized to the radiated power P_R both for the evaluation of the computational power density according to 8.2 and for the validation of the computational DUT model described in 7.2. If the feeding or antenna ports of the DUT are accessible for conducted power measurements, the radiated power P_R may be computed from P_A or P_M provided that all losses in the DUT are characterized with specified uncertainty.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC/IEEE 63195-2:2022



Key

P_A	available power at the source
P_M	power to matched transmission line
P_O	output power accepted by the antenna
P_R	radiated power
Γ_{source}	reflection coefficient of the source
Γ_{TL}	reflection coefficient of the transmission line or matching circuit
Γ_{antenna}	reflection coefficient of the antenna
η_{antenna}	antenna efficiency
TL_{loss}	power dissipated in the transmission lines
$Z_{\text{transform}}$	transformation matrix of the transmission line or matching circuit
FF	far-field
NF	near-field

NOTE The terms and symbols follow the definitions of Clause 3 and IEEE Std 145.

Figure 2 – Power reference planes

7.4 Requirements on the experimental test equipment for model validation

7.4.1 General

This document specifies only generic requirements on the measurement equipment for model validation with the objective to permit the application of different testing instrumentation. The testing instrumentation shall meet the requirements of Clause 6 of IEC/IEEE 63195-1:2021 that are relevant for the validation of the computational DUT model. Clause 6 of IEC/IEEE 63195-1:2021 specifies the requirements on the following:

- ambient noise and temperature in the laboratory as well as reflections from the laboratory walls;
- dynamic range, cross coupling, physical size and calibration of the field probe or probes;

- calibration of the measurement instrumentation that receives the signals from the probe and prepares it for further processing by a computer system;
- spatial resolution, accuracy and repeatability for scanning single probe systems;
- additional requirements on the spatial resolution concerning multiple probe systems, such as the minimum separation distance;
- reporting requirements of the algorithm that determines the measurement grid
- material properties and reflections from the device holder;
- post processing based on the specifications of 8.5 of this document.

For the experimental evaluation of a DUT with the purpose of model validation, the applied equipment shall enable the following:

- direct evaluation of the Poynting vector in the near-field of the DUT without applying any spatial averaging;
- correlation of the Poynting vector with the P_R of the DUT. based on the measured P_A , P_M or P_R ;
- evaluation of the uncertainty budget of the entire experimental evaluation chain.

7.4.2 Ambient conditions and device holder

Requirements on the RF ambient conditions of the test site and on the device holder shall follow 6.2 and 6.6 of IEC/IEEE 63195-1:2021, respectively, which specify requirements on ambient noise, reflections from the laboratory walls, room temperature constraints and material properties, and permissible reflections from the device holder.

7.4.3 Power measurement

7.4.3.1 Conducted power measurement

If the means are available, the radiated power may be evaluated in terms of the conducted power based on power measurements at the source (amplifier) output (P_A) or at the output of the transmission line (P_M) or matching circuit that is connected to the antenna (P_O) (see Figure 2 for details). For the computation of the radiated power, the quantification of the dielectric or conductive losses in the matching circuit, the antenna, etc., cannot be determined during these measurements; they shall be bracketed, e.g. based on worst-case assumptions or third-party data. In such cases, appropriate rationales and references shall be given.

The applied measurement equipment shall have the following characteristics:

- evaluation of P_O , P_M and the reflection coefficients for the connectors and transmission line impedances of the DUT;
- traceable calibration of the measurement of P_O , P_M and the reflection coefficient for the frequency and modulation of the measured signal of the DUT (Clause B.2);
- uncertainty budget.

7.4.3.2 Radiated power measurement

Radiated power measurements may be based on P_R or EIRP measurements and shall have the following characteristics [6]:

- evaluation of the P_R or EIRP in free space;
- traceable calibration of the P_R measurement for the frequency and modulation of the measured signal of the DUT;
- traceable calibration of the EIRP measurement for the frequency and modulation of the measured signal of the DUT;

- d) traceable evaluation of the antenna gain for the computation of P_R from the EIRP (Clause B.3).

NOTE Antenna gain information can be obtained by computations.

- e) uncertainty budget.

When P_R is measured, it is obtained directly as well as is the three-dimensional EIRP distribution. When only EIRP is measured, e.g. at the peak direction of the transmit beam, P_R can be computed only if the antenna gain and its uncertainty are known.

7.5 Testing configurations for the validation of the DUT model

7.5.1 General

In 7.5.2 and 7.5.3, the required tests and comparison of the computational and experimental results for validation of the DUT model are described. In the tests, the electric field or magnetic field in the near-field of the DUT is evaluated on a surface by choosing configurations specified in 8.2. The PD shall be computed from the Poynting vector or electric or magnetic fields following the specification of the measurement system used for the model validation. All results shall be normalized to P_R . For comparison of measured and computed results, the requirements on the experimental test equipment shall be considered (7.4) and the DUT model shall be validated (7.5.3), and the computational and measurement uncertainty shall be evaluated as described in 9.3.

7.5.2 Tests to be performed

7.5.2.1 Frequency bands and antenna configurations

Computational and experimental evaluation of the near-field of the DUT shall be carried out for the centre frequency of each band at which the DUT can operate. For each antenna, antenna array or sub-array that can be operated or controlled individually, one validation computation and measurement shall be carried out in each applicable frequency band.

7.5.2.2 Evaluation in the near-field

The PD of the DUT shall be measured and computed on a rectilinear grid on a rectangular validation measurement surface according to the following steps.

- a) The distance between the validation measurement surface and the DUT shall be less than or equal to the minimum distance between the DUT and the evaluation surface described in 8.3. If measurements at this distance are not possible, the electric or magnetic fields shall be measured at the minimum possible distance considering the limitations of the applied measurement system and the particular characteristics of the DUT. A rationale for the chosen distance shall be given.
- b) The cross section of the validation measurement surface shall completely include the cross section of the computational domain.
- c) The Poynting vector shall be evaluated at the locations of the measured points, i.e. on the measurement grid. If needed, interpolation methods may be used to determine the computation results at the required locations provided that the contributions of these interpolation methods to the uncertainty of the results are considered in the computational uncertainty U_{sim} .
- d) The measured and computed PD shall be normalized to P_R considering dielectric and conduction losses of the antenna (7.4.3).
- e) The uncertainty of the experimental and computational evaluations of the near-field shall be evaluated according to Clause 9.

7.5.3 Determining the validity of the DUT model

The validation of the computational model of the DUT shall be carried out according to the following steps.

- a) Normalize the experimental sPD to the measured P_R , designated as $v_{ref,n}$.
- b) Determine the measurement uncertainty U_{ref} of the evaluation in the near-field according to Table 3 of Clause 8 of IEC/IEEE 63195-1:2021. Table 3 of Clause 8 of IEC/IEEE 63195-1:2021 summarizes the uncertainty components of the measurement system, the DUT, and the environmental factors. The uncertainty of the power normalization according to the chosen power reference plane (see 7.3, Annex B) shall be considered as an additional entry in the evaluation of U_{ref} according to Table 3 of Clause 8 of IEC/IEEE 63195-1:2021. The combined standard uncertainty shall be evaluated for a 95 % confidence interval ($k = 2$).
- c) Normalize the computational sPD to the computed P_R , designated as $v_{sim,n}$.
- d) Determine the computational uncertainty U_{sim} of the evaluation of the sPD according to 9.2.
- e) At every point n at which $v_{ref,n}$ or $v_{sim,n}$ are larger than 5 % of the maximum measured or computed value $\max_n(v_{ref,n}, v_{sim,n})$, validate whether the deviation between the measured value at point n , $v_{ref,n}$ and the computed value $v_{sim,n}$ are within the combined uncertainty of U_{ref} and U_{sim} by evaluating Formula (3):

$$E_n = \sqrt{\frac{(v_{sim,n} - v_{ref,n})^2}{(v_{sim,n} \times U_{sim,k=2})^2 + (v_{ref,n} \times U_{ref,k=2})^2}} \leq 1 \quad (3)$$

The subscript ref in Formula (3) refers to the experimental reference results.

If the deviation is within the combined uncertainty, i.e. if $E_n \leq 1$ for any considered point, the DUT model shall be regarded as valid. If the deviation is not within the expected uncertainty, the DUT model is not valid and shall be revised.

7.5.4 Test reduction for additional DUTs

Similar DUTs may qualify for a reduced model validation where only a subset of DUTs is required to pass the full series of tests specified in 7.5.2. It is possible that applicable national regulations exist. Certain modules may be tested independently. Such validation results can be applicable to other DUTs of a similar type. Examples for models of similar DUTs are devices that share:

- a) the same RF circuitry (transmitter, antenna feed-point, matching components, etc.);
- b) similar dielectric materials with equivalent dielectric properties;
- c) the same antenna and antenna grounding.

If models of similar DUTs are validated with a reduced number of tests or with shared validation results, a rationale shall be given why tests are applicable on the respective modules. This shall be documented separately. Any impact on the uncertainty shall be quantified by additional tests and documented in the uncertainty evaluation (Clause 9).

8 Power density computation and averaging

8.1 Evaluation surface

For frequencies above 6 GHz, guidelines on human exposure to electromagnetic fields specify limits in terms of the power density evaluated as a spatial-average over the averaging area of a certain area A_{av} [7], [8]. In the following, this surface is referred to as the averaging area. This averaging area is part of the evaluation surface. According to 7.2.4 of IEC/IEEE 63195-1:2021, the following different evaluation surfaces are specified:

- a) planar inner surface of the elliptical phantom described in IEC 62209-1528:2020 [9] (7.2.4.2 of IEC/IEEE 63195-1:2021);

NOTE 1 Subclause 7.2.4.2 of IEC/IEEE 63195-1:2021 also specifies the distance between the DUT and the planar evaluation surface.

- b) a planar surface that may be smaller than the inner surface of the elliptical phantom if the application of a smaller surface can be justified;

NOTE 2 A surface smaller than the inner surface of the elliptical phantom can be justified if the DUT or its radiating elements are smaller than the elliptical phantom.

- c) surface of the modified version of the inner shell of the specific anthropomorphic mannequin (SAM) phantom for devices operated at the ear [9] (7.2.4.3 of IEC/IEEE 63195-1:2021);

NOTE 3 Examples for the positioning of the DUT with respect to the evaluation surface or phantom can be found in 7.2.4 of IEC 62209-1528:2020 [9].

- d) specific evaluation surfaces for devices operated at other regions of the body or at regions of the head other than the ear for which the application of one of the above-mentioned averaging areas might not yield an appropriate evaluation of the exposure (7.2.4.4 and 7.2.4.5 of IEC/IEEE 63195-1:2021);

For open evaluation surfaces, such as the surface of the elliptical phantom described in IEC 62209-1528:2020 [9], the surface normal vector points into the direction oriented away from the DUT. For closed evaluation surfaces, such as the modified version of the inner shell of the SAM phantom, the surface normal vector points into the inside of the volume enclosed by the surface.

The coordinates of the inner shell of the SAM phantom with an adapted ear and their surface normal lines are provided as a supplemental file; see Annex I. The spatial-average power density sPD shall be evaluated for all testing configurations described in 8.2. The computation of the $psPD$ according to 8.3, 8.4, 8.5, 8.6 is generally carried out automatically by computational software. The software shall be compliant with the methods specified in 8.6 and shall be verified according to Annex A.

8.2 Tests to be performed and DUT configurations

8.2.1 General

The tests to be performed shall be chosen according to 7.3.1 and 7.3.2 of IEC/IEEE 63195-1:2021 and modelled appropriately. Subclause 7.3.1 of IEC/IEEE 63195-1:2021 specifies the selection of the frequency band, the evaluation surface, and the antenna configurations to be evaluated.

Specific guidance on the evaluation of the $psPD$ of devices with a single radiating element or antenna arrays or sub-arrays (multiple radiating elements) that do not operate simultaneously is specified in 8.2.2. In general, for devices with multiple radiating elements or antenna arrays or sub-arrays, the evaluation of the $mpsPD$ is specified in 8.2.3 and 8.2.4. Figure 3 shows example configurations of radiating elements in different antenna sub-array configurations.

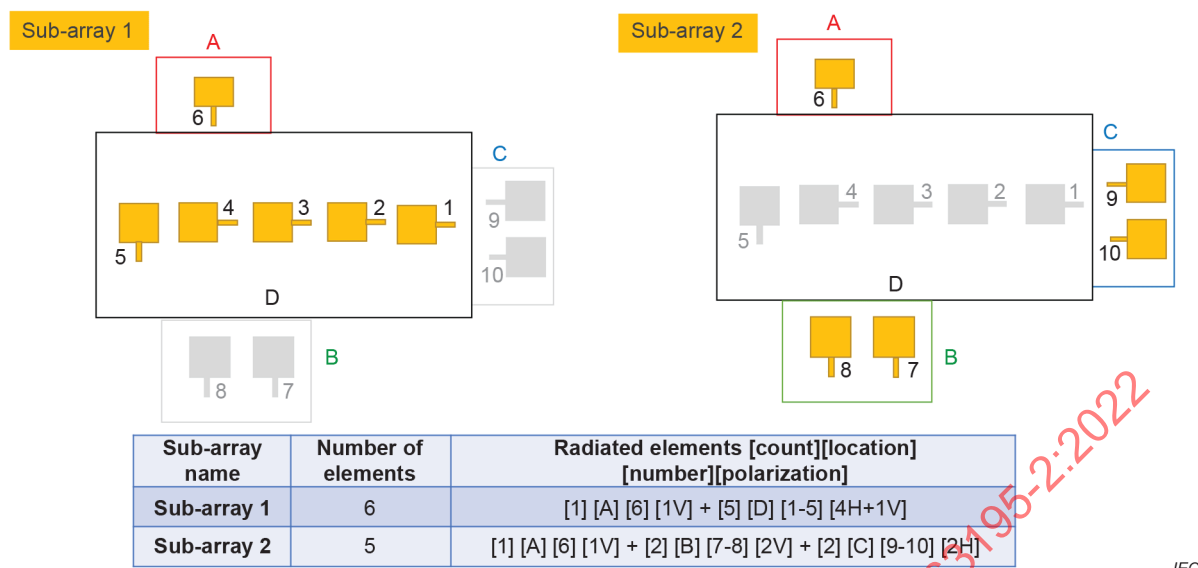


Figure 3 – Example for configurations of radiating elements as different antenna sub-arrays on the same DUT

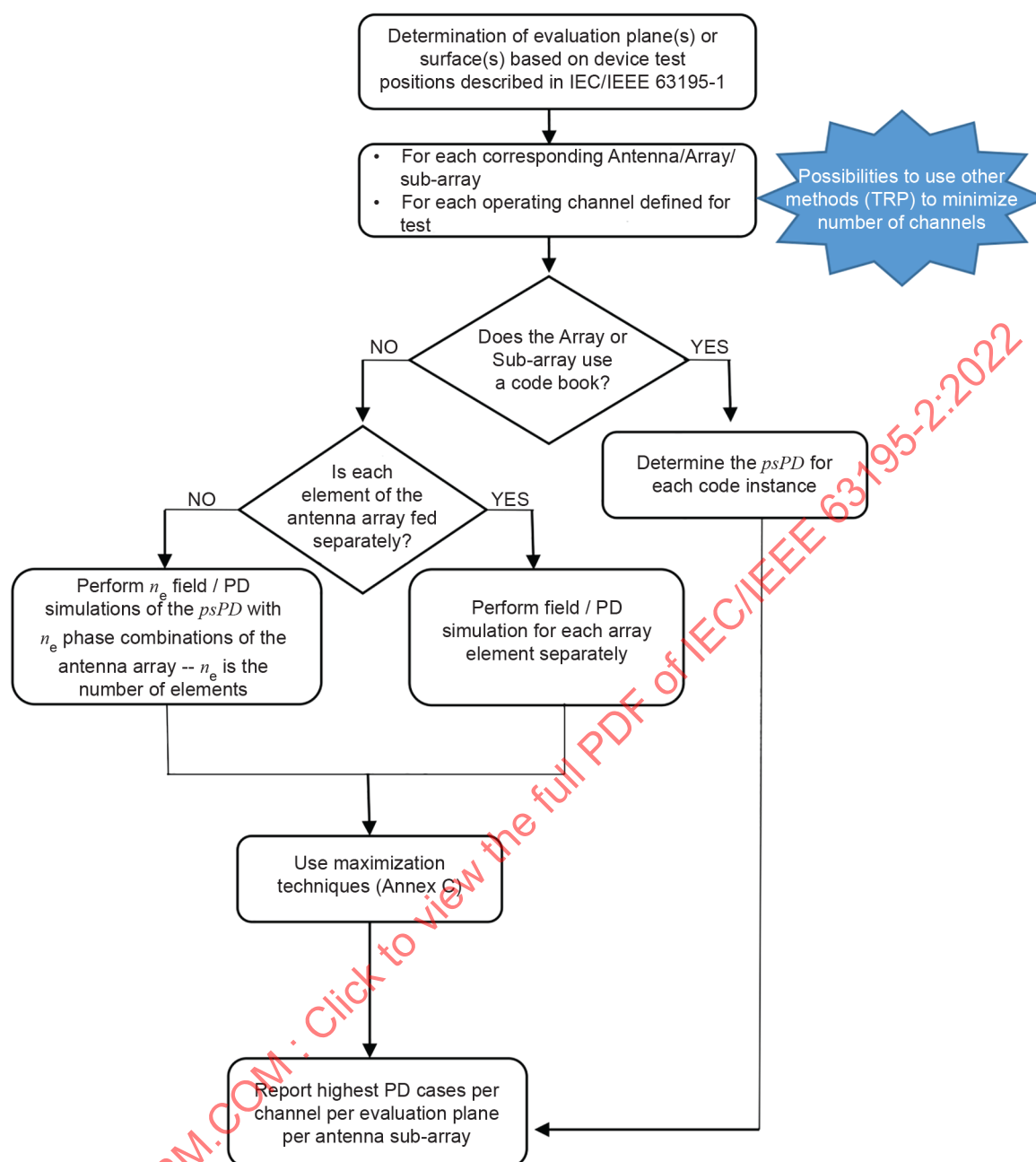
8.2.2 Devices with a single radiating element or with multiple elements that do not operate simultaneously

For DUTs with a single radiating element or antenna arrays or sub-arrays (multiple radiating elements) that do not operate simultaneously, the $psPD$ for a particular testing configuration shall be evaluated as follows.

- Compute the field distribution of the DUT and compute $psPD$ for each active element separately according to 8.3, 8.4, 8.5, 8.6.
- Normalize each $psPD$ to its P_R (7.3).
- Report the $psPD$ of all evaluated elements.

8.2.3 Devices with antenna arrays or sub-arrays

The evaluation of the $mpsPD$ of devices with antenna arrays or sub-arrays is outlined in Figure 4. The sPD shall be computed separately for each RF channel and for each antenna. The $mpsPD$ shall then be determined by superimposing the n_e computed fields under application of a maximization technique specified in Annex C.



IEC

Figure 4 – Flow chart for the evaluation of power density for DUTs with antenna arrays or sub-arrays as described in 8.2.3

8.2.4 Devices with multiple antennas or multiple transmitters

Additional considerations apply to devices with multiple uncorrelated antennas or multiple transmitters or sources that operate independently and can operate in different frequency ranges. Their exposure shall be combined and reported in terms of the total exposure ratio, which is defined in 7.5 of IEC/IEEE 63195-1:2021. If SAR evaluation is required for the computation of the total exposure ratio, computational or experimental SAR results may be applied. The procedures of IEC/IEEE 62704-1:2017 or IEC/IEEE 62704-4:2020 shall be followed for computational SAR evaluation, and the procedures of IEC 62209-1528:2020 [9] for SAR measurements.

8.3 Considerations on the evaluation surface and dimensions of the computational domain

For the computation of $psPD$, the evaluation surface need not be contained entirely in the computational domain. The field components on it are computed directly by the computational method or by expansion techniques applying the surface equivalence principle. The positioning of the evaluation surface with respect to the DUT shall be carried out according to 7.2.4 of IEC/IEEE 63195-1:2021. See 8.1 for details.

In the far-field of a DUT, the $psPD$ is likely to occur in the direction of the main beam. In the near-field, it may be located anywhere above the surface of the DUT. Depending on the field distribution, the dynamic range of the field pattern, and the dimensions of the computational domain, the absorbing boundary conditions can introduce significant uncertainties for the evaluation of the $psPD$; these uncertainties are considered in the computational uncertainty budget (9.2.3). The fields outside the computational domain that are determined by applying the surface equivalence principle are subject to the same sources of computational uncertainty.

If the evaluation surface is not entirely included in the computational domain and the electric field and magnetic field on it are evaluated using the surface equivalence principle, the computational domain shall be chosen such that the reactive field of the DUT is not cut off by the absorbing boundary conditions. The extension of the reactive field is not known beforehand. Hence, the dimensions of the computational domain shall be determined in a series of computations with increasing dimensions of the computational domain. The dimensions of the near-field may be identified by comparison of the ratio of the local electric field and magnetic field amplitudes to the free space wave impedance.

8.4 Averaging of power density on an evaluation surface

8.4.1 General

The $psPD$ is evaluated as the absolute maximum of the sPD , which is computed on an evaluation surface for an averaging area of a given size and shape. The evaluation surface is specified in 8.1. For the computation of the sPD , the power passing through the surface is computed by computational integration of the power density PD over a surface $\hat{A}$ within the averaging area A_{av} . The size of the averaging A_{av} is specified in the respective exposure guidelines [7], [8] as 1 cm² or 4 cm² depending on the operational frequency of the DUT. Depending on the shape of the evaluation surface, two different approaches are applied to construct the averaging area.

- a) If the evaluation surface is entirely planar, the averaging area has the shape of a square with the edge length $a_{av} = \sqrt{A_{av}}$. The square averaging area shall entirely be contained in the evaluation surface. See 8.4.2.1 for details. In this case, the area of $\hat{A}$ is identical to the averaging area A_{av} .
- b) If the evaluation surface is not entirely planar, the averaging area is constructed as the intersection of the evaluation surface with a sphere with a radius $r_{av} = \sqrt{A_{av}/\pi}$. The centre point of the sphere is a point on the evaluation surface, and the area $\hat{A}$ is the region of the evaluation surface that is contained in the sphere. The area $\hat{A}$ may deviate from A_{av} .

NOTE 1 Typically, the square shaped averaging area is applied on a surface that is established by a flat phantom. The intersection with a sphere is applied when averaging, e.g. over the inner shell of the SAM head.

NOTE 2 The averaging algorithm for planar evaluation surfaces using a square averaging in this document is specified to align with the definitions of the shape of the averaging area as defined in the exposure guidelines [7], [8]. While the guidelines foresee the application of a square averaging area on non-planar evaluation surfaces, it is important to note that a sphere is used for non-planar evaluation surfaces to construct the shape of the averaging area to keep the implementation of the algorithm simple. The specification of an averaging algorithm for non-planar evaluation surfaces based on a rotating cube is foreseen for the revision of this document. Such an algorithm would yield an averaging area that approximates a square shape on non-planar evaluation planes. A suggestion for a specification is given in Annex G.

The evaluation surface or parts of it may be contained in the computational domain. Electric and magnetic fields on the evaluation surface outside the computational domain shall be computed using the surface equivalence principle.

8.4.2 Construction of the averaging area on an evaluation surface

8.4.2.1 Planar evaluation surface

For the evaluation of the sPD on a planar evaluation surface, the averaging area shall be constructed as a square with the edge length $a_{av} = \sqrt{A_{av}}$ around each centre point. The centre points are the vertices of the triangulated evaluation surface, and the square shall be contained entirely in the evaluation surface.

NOTE IEC TR 63170:2018 [2] specifies the intersection with the sphere or circle.

The evaluation surface shall be triangulated. The edge lengths of the triangles shall not exceed d_T , which shall be 1 mm or $\lambda/10$ (whichever is less). The square shall be rotated around its centre point in steps not larger than 5° to find the orientation that maximizes the power that passes through the square. If any of the corner points of the square lies outside the evaluation surface for any of the rotation angles, no sPD shall be computed for the centre point of the square even if the square is entirely contained in the evaluation surface for one or more orientation angles.

The triangulation points may coincide with the nodes of a Cartesian mesh. As an alternative to the triangulation, the evaluation surface may be subdivided in rectangles with a maximum edge length d_T .

Example algorithms for the construction of the averaging area on a planar evaluation surface are given in Clause D.1. The implementation of the algorithm shall be verified according to the verification benchmarks for the power density averaging algorithm as specified in A.6.2.

8.4.2.2 Non-planar evaluation surface

For the evaluation of sPD on a non-planar evaluation surface, any triangulation algorithm may be used to triangulate the evaluation surface. The edge lengths of the triangles shall not exceed d_T , which shall be 1 mm or $\lambda/10$ (whichever is less). Averaging areas shall be constructed around each centre point on the evaluation surface with the help of a sphere of a fixed size and a radius $r_{av} = \sqrt{A_{av}/\pi}$. The centre points are the vertices of the triangulated evaluation surface.

The area of the cross section of the sphere that contains the centre point has the size A_{av} . The sPD shall then be evaluated by determining the area of the evaluation surface that is contained in the sphere (Figure 5). Only those triangles shall be considered for the averaging that are connected to the triangle that contains the centre point via other triangles that are located completely inside the sphere. Triangles are regarded as connected if they share a vertex.

NOTE Connecting all triangles of the averaging area to the triangle containing the centre point by triangles that are contained in the sphere prevents disjunct averaging areas, which can otherwise occur, e.g. in neighbouring fingers.

Example algorithms for the construction of the evaluation areas on a non-planar surface are given in Clause D.2. The implementation of the algorithm shall be verified according to the verification benchmarks for the power density averaging algorithm as specified in A.6.3.

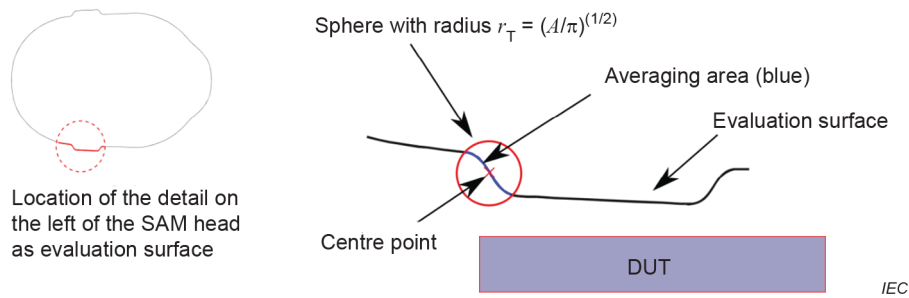


Figure 5 – Example of the construction of the averaging area within a sphere with fixed radius according to 8.4

8.5 Computation of sPD by integration of the Poynting vector

8.5.1 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 exposure in the near-field of the DUT, 8.5.2, 8.5.3, and 8.5.4 specify the expressions for the computation of the sPD for the different specifications of the PD . Weighting functions in the integrands of the expressions of 8.5.2, 8.5.3, and 8.5.4 avoid contributions from regions where the Poynting vector is oriented outward from the evaluation surface or due to computational inaccuracies for surfaces which are almost parallel to the direction of the Poynting vector, by scaling down the integrand at these regions to zero.

NOTE 1 The areas of the triangles (8.4.2) on which the integrand is scaled down or set to zero by a weighting function fully contribute to the averaging area.

NOTE 2 IEC TR 63170:2018 [2] does not consider the direction of the Poynting vector with respect to the orientation of the evaluation surface. This corresponds to setting the weighting functions of the expressions in 8.5.2 and 8.5.3 equal to 1.

NOTE 3 The expression used to compute the PD can depend on the applicable exposure guidelines or national regulations.

8.5.2 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 computed according to Formula (4):

$$sPD(r_0) = \frac{1}{\hat{A}(r_0)} \int_{\hat{A}(r_0)} \Re\{S(r)\} \cdot n_A(r) \cdot \Theta[\Re\{S(r)\} \cdot n_A(r)] d\hat{A}(r) \quad (4)$$

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 square or the intersection of the sphere and the evaluation surface that is directly connected to the location r , i.e. the sum of the areas of the triangles inside the sphere that are considered for the computation of the sPD at the location r ;

r_0 is the location of the centre point.

NOTE 1 The surface normal propagating power density into the phantom as defined in IEC TR 63170:2018 [2] corresponds to sPD_{n+} with $\Theta(x) = 1$.

NOTE 2 Formula (4) 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} .

8.5.3 Total propagating power density into the evaluation surface, sPD_{tot+}

The total propagating power density into the evaluation surface, sPD_{tot+} , shall be computed according to Formula (5), along with Formula (6) and Formula (7).

$$sPD(r_0) = \frac{1}{\hat{A}(r_0)} \int_{A(r_0)} \|\Re\{S(r)\}\| \cdot \Xi\{\cos^{-1}[n_R(r) \cdot n_A(r)]\} d\hat{A}(r) \quad (5)$$

where

$$n_R(r) = \Re\{S(r)\} / \|\Re\{S(r)\}\| \quad (6)$$

$$\Xi(\theta) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \theta < 85^\circ \\ 1 - (\theta - 85^\circ)/5^\circ, & 85^\circ \leq \theta < 90^\circ \\ 0, & \theta \geq 90^\circ \end{cases} \quad (7)$$

$\|\Re\{S(r)\}\|$ is the magnitude of the real part of the complex Poynting vector S at the location r ; other terms are as specified in 8.5.2.

NOTE 1 The total propagating power density into the evaluation surface as defined in IEC TR 63170:2018 [2] corresponds to sPD_{tot+} with $\Xi(\theta) = 1$.

NOTE 2 Formula (5) corresponds to magnitude of the real part of the Poynting vector on a surface A , i.e. providing an overestimation of Formula (4).

8.5.4 Total power density directed into the phantom considering near-field exposure, sPD_{mod+}

The quantity sPD_{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 region. It shall be computed according to Formula (8).

$$sPD(r_0) = \frac{1}{\hat{A}(r_0)} \int_{A(r_0)} \left[\left(\|\Re\{S(r)\}\| \cdot \Xi\{\cos^{-1}[n_R(r) \cdot n_A(r)]\} \right)^2 + \left(\|\Im\{S(r)\}\| \right)^2 \right]^{1/2} d\hat{A}(r) \quad (8)$$

where

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

other terms are as specified in 8.5.2 and 8.5.3.

NOTE Formula (8) corresponds to magnitude of the Poynting vector (real and imaginary parts) on a surface A , i.e. an overestimation of Formula (4) and Formula (5).

8.6 Software

The software that implements power density averaging according to 8.4 shall make reference to this document, [7], [8], and if applicable, to [10]. In its graphical user interface or in its command line interface, the software shall provide the following options for the averaging.

- a) Construction of the averaging area based on a
 - "sq": rotating square for planar evaluation surfaces (8.4.2.1).
 - "circ": sphere for non-planar evaluation surfaces (8.4.2.2).
- b) Computation of the sPD based on the
 - sPD_{n+} ("area": "circ" or "sq"): surface normal propagating power density directed into the phantom averaged over "area" in units of cm^2 (e.g. 1 cm^2 or 4 cm^2) with the intersection of the sphere (circ) or cube (sq) (8.5.2).
 - sPD_{tot+} ("area": "circ" or "sq"): total propagating power density directed into the phantom averaged over "area" units of cm^2 (e.g. 1 cm^2 or 4 cm^2) with the intersection of the sphere (circ) or cube (sq) (8.5.3).
 - sPD_{mod+} ("area": "circ" or "sq"): averaged over "area" units of cm^2 (e.g. 1 cm^2 or 4 cm^2) with the intersection of the sphere (circ) or cube (sq) (8.5.4).

The options in the graphical user interface of the software shall be labelled according to the list above. Functions in the command line interface shall be documented with reference to the relevant subclauses of this document.

The software shall display a warning message if the selected dimensions of the averaging area A_{av} are not compliant with [7], [8] or this document considering the dimensions of 1 cm^2 or 4 cm^2 , the evaluation frequency and if planar averaging is applied on a non-planar surface or if the non-planar averaging is applied on a planar surface. Implementation examples are given in Annex D.

9 Uncertainty evaluation

9.1 General

The procedures described for the evaluation of the computational uncertainty are based on those of IEC/IEEE 62704-1:2017 and IEC/IEEE 62704-4:2020 and were adapted to the particular requirements of this document considering both FDTD and FEM. They include the evaluation of the uncertainty contribution of the computational parameters (9.2), the uncertainty contribution of the computational representation of the DUT (9.3) and the uncertainty of the maximization of the $psPD$ (9.4)

The evaluation of the uncertainty contribution of the computational representation of the DUT due to the computational parameters specified in 9.2 is required a) for the validation of the computational model according to 7.5.3 and b) for the evaluation of the overall uncertainty of the $mpsPD$. Hence, the procedures of 9.2 apply to both the evaluation of the sPD and of the $mpsPD$.

9.2 Uncertainty of the sPD and of the $mpsPD$ due to the computational parameters

9.2.1 Uncertainty contributions due to the computational parameters

Table 1 specifies the uncertainty budget of the contributions of the computational parameters to the results of the validation setup or testing setup. The details on how to quantify the uncertainty components are described in 9.2.2, 9.2.3, 9.2.4, 9.2.5, 9.2.6, 9.2.7 and 9.2.8.

Table 1 – Budget of the uncertainty contributions of the computational algorithm for the validation setup or testing setup

a	b	c	d	e	f	g	h
Uncertainty component	Subclause	Tolerance %	Probability distribution	Divisor	c_i	Uncertainty %	v_i or v_{eff}
Mesh resolution	9.2.2		N	1	1		
ABC	9.2.3		N	1	1		
Power budget	9.2.4		N	1	1		
Model truncation	9.2.5						
Convergence	9.2.6		R	1,73	1		
DUT dielectrics	9.2.7		N	1	1		
Lossy conductors	9.2.8		R	1,73	1		
Combined standard uncertainty ($k = 1$)							
Columns c, g, and h shall be filled in based on the results of the DUT computations. NOTE 1 Column headings a to h are given for reference. NOTE 2 Abbreviations used in Table 1: N – normal probability distribution; R – rectangular probability distribution NOTE 3 The divisor is a function of the probability distribution (d) and degrees of freedom (v_i and v_{eff}) (h). NOTE 4 c_i is the sensitivity coefficient that is applied to convert the variability of the uncertainty component into a variability of the <i>sPD</i> or <i>mpsPD</i>.							

9.2.2 Mesh resolution

9.2.2.1 FEM meshes

The mesh density has a major impact on the accuracy of the results; therefore, *sPD* and *mpsPD* results produced with a particular initial mesh *M* need to be compared with results produced with a denser mesh *M'*. Either of the following two strategies shall be applied depending on whether the FEM code used for the evaluation employs adaptive mesh refinement or not.

- If the applied FEM code does not employ adaptive mesh refinement, the number of mesh elements per wavelength used for the initial mesh *M* shall be increased by at least 50 % considering the respective wavelengths in the dielectrics.
- If the applied FEM code employs adaptive mesh refinement, additional adaptive passes shall be performed until the number of mesh elements has increased by at least 20 % for second or third lowest order and 50 % for lowest order.

In both cases, the *PD* shall be recorded in the region where the *sPD* or *mpsPD* maximum is expected. Both minimum and maximum edge lengths in this region and in the region around the antenna of the denser mesh *M'* shall be less than or equal to 50 % of the respective edge lengths of *M*. The location of the *sPD* or *mpsPD* maximum in the region of mesh *M'* shall not deviate by more than the minimum mesh edge length from the location of the electric field maximum within the respective region of mesh *M*. The maximum *sPD* or *mpsPD* deviation shall be reported in Table 1 as uncertainty with rectangular probability distribution.

9.2.2.2 FDTD meshes

The effect of the mesh resolution shall be determined by increasing the number of mesh cells by increasing their total number by a factor of two with respect to the original computation. The mesh refinement that leads to the increase of the number of cells shall be applied in the region of the sPD or $mpsPD$ maximum. Both minimum and maximum edge lengths in this region and in the region around the antenna of the denser mesh M' shall be less than or equal to 50 % of the respective edge lengths of M . The location of the sPD or $mpsPD$ maximum in the region of mesh M' shall not deviate by more than the minimum mesh edge length from the location of the electric field maximum within the respective region of mesh M .

The maximum deviation of the sPD or $mpsPD$ shall be reported in Table 1 assuming normal probability distribution.

9.2.3 Absorbing boundary conditions

The impact of the absorbing boundaries conditions shall be determined by moving the boundaries outward by a $\lambda/4$ in all directions. The maximum deviation of the sPD or $mpsPD$ shall be reported in Table 1 assuming rectangular probability distribution.

NOTE The location of the maximum electric or magnetic energy at the boundary can correspond to the main beam of a radiating structure or to its reactive field.

9.2.4 Power budget

The power fed into the computational domain shall be recorded at the sources (P_M or P_O). The sum of the power absorbed in the lossy dielectrics, lossy conductors and passive components in the computational domain and radiated into the ABCs shall be recorded and compared to P_M or P_O . The deviation shall be reported in Table 1 assuming normal probability distribution.

When simulating devices with multiple sources operating simultaneously, it is recommended to excite each port separately while loading the inactive ports with the reference impedance in order to compute the full S -matrix of the multiport system. As such, the $psPD$ and the power budget for a given excitation vector can be computed by superimposing the fields for any excitation vector and load. For details refer to, for example, [10].

9.2.5 Model truncation

The impact of the model truncation on sPD or $mpsPD$ shall be evaluated by appropriate comparison to the untruncated model. See step g) of 7.2.

9.2.6 Convergence

9.2.6.1 Frequency domain FEM solvers

For FEM meshes, the convergence uncertainty is already covered by the mesh resolution uncertainty (9.2.1). No additional uncertainty contribution shall be applied.

9.2.6.2 FDTD computations with harmonic excitation

The electric field vector components shall be recorded in the time domain in the region where the maximum sPD or $mpsPD$ is located. The absolute value of the vector shall be computed at each time step. For a sufficiently converged computation, the deviation of the last three local maxima (of the time-domain signal) of the squared absolute values of the electric fields from their mean value shall not be larger than 2 %, and the maxima shall be found in the same voxel. If the computation cannot be run for a sufficient time to reach a deviation of less than 2 %, a rationale shall be given in the test report explaining why a relaxed tolerance can be used for the particular application under test to rule out incorrectly configured computations, i.e. to which extent the convergence contributes to the target quantity.

9.2.6.3 FDTD computations with broadband excitation

For broadband computations with evaluation of the *sPD* or *mpsPD* by Fourier transformation, a signal with a pulse shaped envelope is used for excitation. The electric field components shall be recorded in the time domain as described in 9.2.6.2. If the *sPD* or *mpsPD* is evaluated at several frequencies, frequency-dependent changes in location of the target quantity shall be considered. For the evaluation of the uncertainty, the discrete Fourier transform (DFT) of the time-domain signal shall be computed for increasing windowing lengths t_w starting at $t_0 = 0$ and ending at $t_w = 1,25 \times n \times T$. T is the period of the evaluation frequency and n is an integer number that shall be increased until t_w reaches the end of the computed time or until the convergence limit has been reached. The deviation of the last two squared absolute values of the DFT results at the evaluation frequency from their mean value shall not be larger than 2 % for a sufficiently converged computation. If the computation cannot be run for a sufficient amount of time to reach a deviation of less than 2 %, a rationale shall be given in the test report explaining why a relaxed tolerance is used for the particular application under test to rule out incorrectly configured computations.

9.2.6.4 Reporting the convergence uncertainty

The deviation shall be reported in Table 1 as uncertainty with rectangular probability distribution.

Since the location of the *sPD* or *mpsPD* is generally not known beforehand, it is recommended to select the relevant region large enough to avoid repeated computations. Testing computations with coarser meshes or simplified geometry can help to limit the computational expenses to identify the relevant regions for the recording of the signals.

9.2.7 Dielectric properties

The dielectric properties of the DUT model are usually affected by uncertainties according to their specification. The impact of these uncertainties on the *sPD* or *mpsPD* shall be evaluated by applying the minimum and maximum conductivity and permittivity (four different combinations). The minimum and maximum shall be chosen according to the uncertainty that is reported in the reference documentation of the dielectric properties, e.g. data sheet, publication. In order to avoid excessive numbers of computations for structures with a large number of different dielectrics, the changes in conductivity and permittivity may be limited to the region where most of the electromagnetic energy is confined or absorbed, or advanced statistical methods may be applied for the quantification of the uncertainty. In such cases, an appropriate rationale shall be given. The deviation shall be reported in Table 1 as uncertainty with normal probability distribution.

9.2.8 Lossy conductors

The finite conductivity of the conductors of the DUT shall be varied according to their specification. The impact of the specified uncertainties shall be evaluated by applying the minimum and maximum conductivity of all conductors of the DUT (two computations). The minimum and maximum shall be chosen according to the uncertainty that is reported in the reference documentation of the conductors, e.g. data sheet, publication. The deviation shall be reported in Table 1 as uncertainty with rectangular probability distribution.

9.3 Uncertainty contribution of the computational representation of the DUT model

The uncertainty contribution of the computational representation of the DUT model shall be determined by the experimental and computational evaluation of the distribution of the *PD* in a plane at the distance validation measurement in the near-field (7.5.2.2) with a cross section of the dimensions of the evaluation surface on a rectilinear mesh with steps no larger than $\lambda/4$ with at least 100 points. The uncertainty is evaluated according to Formula (9).

$$U_d[\%] = 100 \times \max_n \left\{ \frac{|v_{\text{meas},n}^2 - v_{\text{sim},n}^2|}{\max \left(\max_n |v_{\text{meas},n}^2|, \max_n |v_{\text{sim},n}^2| \right)} \right\} \quad (9)$$

where

$v_{\text{meas},n}^2$ is the experimentally determined *PD* at position *n* or its accurate reference solution;

$v_{\text{sim},n}^2$ is the computationally determined *PD* at position *n*.

The mesh step mentioned in 9.3 refers to the measurement mesh. For the computational evaluation, a finer mesh is generally required.

The reference documentation of the applied instrumentation and/or appropriate measurement standards describing the specific application of this general approach should provide sufficient details to help facilitate correctness of the reference configuration setup. The uncertainties shall be reported in Table 2.

Table 2 – Budget of the uncertainty of the developed model of the DUT

a	b	c	d	e	f	g	h
Uncertainty component	Subclause	Tolerance %	Probability distribution	Divisor	c_i	Uncertainty %	v_i or v_{eff}
DUT model (field distribution in the near-field)	9.3		N	1	1		
Measurement equipment and procedure	According to manufacturer specification and/or applied methodology including the evaluation of the conducted or radiated power measurement (7.4.3)		N	1	1		
Combined standard uncertainty ($k = 1$)							
Columns c, g and h shall be filled in based on the results of the DUT computations.							
NOTE 1 Column headings a to h are given for reference.							
NOTE 2 Abbreviation used in Table 2:							
N – normal probability distribution							
NOTE 3 The divisor is a function of the probability distribution (d) and degrees of freedom (v_i and v_{eff}) (h).							
NOTE 4 c_i is the sensitivity coefficient that is applied to convert the variability of the uncertainty component into a variability of the <i>sPD</i> or <i>mpsPD</i> .							

9.4 Uncertainty of the maximum exposure evaluation

For codebooks that are relatively small, such that the exhaustive search method shall be used, the uncertainty of the maximum exposure evaluation is zero.

a	b	c	d	e	f	g	h
Uncertainty component	Subclause	Tolerance %	Probability distribution	Divisor	c_i	Uncertainty %	v_i or v_{eff}
Test setup with respect to computation parameters	9.2		N	1	1		
Computational model of the test setup	9.3		N	1	1		
Field maximization	Annex C		N	1	1		
Combined standard uncertainty ($k = 1$)							
Expanded uncertainty ($k = 2$)							

Columns c, g and h shall be filled in based on the results of Table 1 and Table 2.

NOTE 1 Column headings a to h are given for reference.

NOTE 2 Abbreviation used in Table 3:

N – normal probability distribution

NOTE 3 The divisor is a function of the probability distribution (d) and degrees of freedom (v_i and v_{eff}) (h).

NOTE 4 c_i is the sensitivity coefficient that is applied to convert the variability of the uncertainty component into a variability of the *mpsPD*.

10 Reporting

The test report shall contain the description of all steps that show the development and experimental validation of the DUT model, the tests that were performed and their results with respect to the applicable exposure standards as well as the uncertainty budget. These steps shall be described such that the development and computational evaluation of the DUT model can be reproduced independently. In detail, the testing report shall contain the following sections.

a) General:

- 1) identification of the test laboratory;
- 2) conformity requirements, e.g. test standards, exposure guidelines;
- 3) applicable exposure limits, e.g. ICNIRP, IEEE/ICES [7], [8];
- 4) specification of the evaluation plane and the sPD (see 8.3, 8.4, 8.5, 8.6) formula(s) applied for the evaluation of the $mpsPD$;
- 5) identification of the software used for the testing, including version number, and statement of conformity with this document;
- 6) identification of the algorithm for computation of the $mpsPD$.

b) Description of the DUT:

- 1) identification of the DUT including hardware and software revision numbers, serial number;
- 2) description of the form factor of the DUT and a brief description of its intended function;
- 3) description of the operating modes of the DUT, such as frequency bands, power level, beam shaping options, codebook (if applicable);
- 4) description of the technical documentation provided for the development of the DUT model, such as CAD, data, circuit diagrams, data sheets.

c) Development of the DUT model:

- 1) overview of parts of the DUT that are included and excluded from the model, and rationale for the excluded parts;
- 2) description of the modelling of the sources, impedance matching, the RF signal paths and the antenna;
- 3) list of the applied dielectric material properties with references or a rationale for their values if no appropriate reference is available;
- 4) computation settings, such as mesh resolution, convergence criteria, dimensions of the computational domain, boundary conditions.

d) Validation of the DUT model:

- 1) description of the tests that were performed and rationale for choosing them;
- 2) measurement instrumentation;
- 3) measurement setup and protocol;
- 4) tabular and graphical comparison of measured and computed results including statement on applicability of the DUT model for the evaluation of the sPD ;
- 5) power reference plane chosen for the experimental quantification of P_R of the DUT, rationale for the choice and assumptions required for the computation of P_R ;
- 6) description and rationale for reduced number of validation tests for similar DUTs according to 7.5.4;
- 7) experimental and computational uncertainty budgets for the validation of the DUT model.

e) Performed tests and results:

- 1) description of the performed testing (positions, evaluation surfaces, etc.) according to 8.2;
- 2) applied method to evaluate the *mpsPD* (field maximization technique, optimization, codebook, etc.);
- 3) applied power normalization of computed results to DUT output;
- 4) list of all frequency bands and beam directions tested;
- 5) *mpsPD* over the testing positions, bands, operating modes, and device configurations including
 - i) total radiated power P_R (computational evaluation) of the DUT during the measurement (experimental evaluation),
 - ii) excitation vector,
 - iii) location and shape of the averaging area of the *mpsPD* by highlighting it on the evaluation surface in the graphical user interface of the evaluation software, and
 - iv) applied averaging algorithm according to 8.6.

f) Computational uncertainty budget of the overall evaluation of the *mpsPD*.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC/IEEE 63195-2:2022

Annex A (normative)

Code verification

A.1 General

Software applied for the computation of the $psPD$ for power density evaluation of wireless devices shall be verified according to IEC/IEEE 62704-1:2017 (FDTD) or IEC/IEEE 62704-4:2020 (FEM). For the computation of the $psPD$ according to this document, additional evaluations shall be carried out to verify the correct implementation of the interpolation and superposition algorithms (Clause A.2 and Clause A.3), of metallic losses (Clause A.4) and anisotropic dielectrics (Clause A.5). These are required for the efficient computational evaluation of phased array systems in the frequency range of the scope of this document. In addition, the implementation of the algorithm for the computation of the $psPD$ according to Clause 7 shall be verified (Clause A.6). These benchmarks are specified such that they can be applied both on FDTD- and FEM-based software.

A.2 Interpolation and superposition of vector field components

The correct implementation of interpolation and superposition of vector field components shall be verified by evaluating the fields from three $\lambda/2$ -dipoles, D_1 , D_2 , and D_3 , operating simultaneously at a frequency of 24 GHz with different amplitudes and phase offsets. The dipoles shall have lengths of 6,2 mm. The axis of the first dipole shall be aligned with the z -axis of the coordinate system, the axis of the second dipole shall be aligned with the x -axis of the coordinate system centred with its feed-point on the origin, and the axis of the third dipole shall be aligned with the y -axis of the coordinate system. The feed-points shall be placed in the centres of the dipoles. They shall be modelled as hard-sources or voltage sources with a finite inner resistance. The distances between centres of the feed-points shall be 7,0 mm. The configuration is shown in Figure A.1. In the FDTD computations, the x -axis intersects the feed-points in the centres of the dipoles D_1 and D_3 . To avoid this intersection, the feed-points may be modelled by two subsequent sources with equal signals. The feed-point of the dipole D_2 may be modelled by two subsequent sources, as well.

NOTE Inhomogeneous meshing* (varying mesh step size) can be necessary for the discretization of this antenna configuration.

The dipoles shall be modelled as perfectly conducting filaments: the electric fields on their axis shall be zero, such that their diameter can be assumed to be significantly smaller than the length of the mesh edges in their cross sections. Alternatively, a diameter of 0,05 mm can be applied. The lengths of the mesh edges or vertices can be chosen by the software or the user.

The dipoles shall be excited with different source and amplitude and phase configurations given in Table A.1. The three dipoles shall be excited consecutively. The electric and magnetic fields shall be superimposed using the built-in post-processing functions of the software under test.

The x -, y - and z -vector components of the electric and magnetic fields shall be evaluated on two cubical surfaces with edge lengths of 10,0 mm and 16,0 mm centred about the origin. On the surfaces of the cube, evaluation points are specified on a rectilinear lattice with a spacing of 0,5 mm. All electric and magnetic vector field components of the fields computed with the software under test shall be compared to reference results on the six rectilinear lattices of the cube. The reference results are provided as supplemental files; see Annex I. The reference results are based on computation results obtained using the method of moments [11] codes that have been validated according to IEC/IEEE 62704-1:2017 or IEC/IEEE 62704-4:2020. The maximum deviation of the electric field and magnetic field amplitudes that are greater than or equal to 10 % of the maximum of the reference results shall be evaluated and reported in Table A.1. The maximum permissible deviation from the reference results is 10,0 %.

Dimensions in millimetres

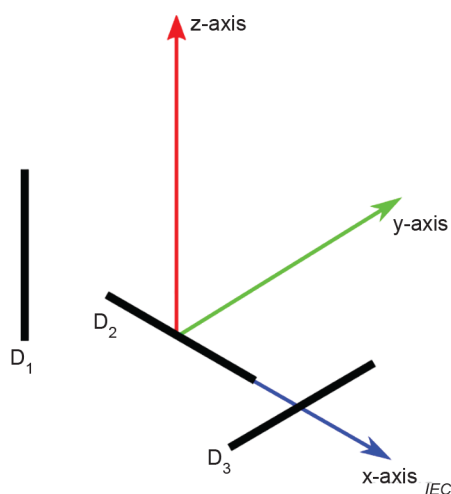


Figure A.1 – Configuration of three $\lambda/2$ dipoles, D_1 , D_2 , and D_3 , for the evaluation of the interpolation and superposition of the electric field and magnetic field components

Table A.1 – Interpolation and superposition of vector field components; maximum permissible deviation from the reference results is 10 %

Amplitudes and phases	Maximum deviation from reference on 10 mm cube		Maximum deviation from reference on 16 mm cube	
	electric field amplitude	magnetic field amplitude	electric field amplitude	magnetic field amplitude
Configuration 1 D_1 : $A = 1 \text{ V}$, $\varphi = 0^\circ$ D_2 : $A = 0,5 \text{ V}$, $\varphi = 90^\circ$ D_3 : $A = 2 \text{ V}$, $\varphi = 180^\circ$				
Configuration 2 D_1 : $A = 2 \text{ V}$, $\varphi = 0^\circ$ D_2 : $A = 2 \text{ V}$, $\varphi = 90^\circ$ D_3 : $A = 2 \text{ V}$, $\varphi = 0^\circ$				
Configuration 3 D_1 : $A = 1 \text{ V}$, $\varphi = 180^\circ$ D_2 : $A = 0,5 \text{ V}$, $\varphi = 90^\circ$ D_3 : $A = 2 \text{ V}$, $\varphi = 180^\circ$				

A.3 Computation of the far-field pattern and the radiated power

The far-field pattern and the radiated power P_R shall be computed for all dipole configurations specified in Table A.1 for consecutive and simultaneous excitation. For consecutive excitation, the fields shall be superimposed using the built-in functions of the software under test before computing P_R . The far-field pattern shall be computed in units of the electrical fields over the entire solid angle in steps of 10° for φ and θ over the entire solid angle starting at 0° for both φ and θ . Reference results are provided as supplemental files; see Annex I. The reference results are based on the average of computation results obtained using the method of moments. The maximum deviation of the electric field amplitudes that are greater than or equal to 10 % of the maximum of the reference results shall be evaluated and reported in Table A.2. The maximum permissible deviation from the reference results for the field amplitudes and for the total radiated power is 10,0 %.

Table A.2 – Computation of P_R ; maximum permissible deviation from the reference results is 10 % for the radiated power and for the electric field amplitude of the far-field pattern

Excitation	Amplitudes and phases	Computed power in watts	Reference power in watts	Maximum deviation of the electric field amplitude of the far-field pattern from reference
consecutive	D_1 : $A = 1 \text{ V}$, $\varphi = 0^\circ$ D_2 : $A = 0,5 \text{ V}$, $\varphi = 90^\circ$ D_3 : $A = 2 \text{ V}$, $\varphi = 180^\circ$		0,023 0	
	D_1 : $A = 2 \text{ V/m}$, $\varphi = 0^\circ$ D_2 : $A = 2 \text{ V/m}$, $\varphi = 90^\circ$ D_3 : $A = 2 \text{ V/m}$, $\varphi = 0^\circ$		0,052 7	
	D_1 : $A = 1 \text{ V/m}$, $\varphi = 180^\circ$ D_2 : $A = 0,5 \text{ V/m}$, $\varphi = 90^\circ$ D_3 : $A = 2 \text{ V/m}$, $\varphi = 180^\circ$		0,023 0	

A.4 Implementation of lossy conductors

The implementation of metallic conductors with finite conductivity shall be evaluated by modelling the decay of the propagating amplitude of the TE_{10} mode in a rectangular waveguide in terms of the complex propagation constant k_z . The evaluation of k_z follows the procedures specified in IEC/IEEE 62704-1:2017 and IEC/IEEE 62704-4:2020.

The complex propagation constant shall be evaluated in the computational model of an R320 waveguide with the inner cross section of $7,112 \text{ mm} \times 3,556 \text{ mm}$ over a frequency range from 25 GHz to 40 GHz. For the FDTD method, a broadband signal shall be used, and the attenuation constant $\text{Im}\{k_z\} = \alpha$ shall be evaluated as a function of the frequency. For FEM, discrete frequencies with a step size of 250 MHz shall be evaluated. All directions and dimensions correspond to the coordinate system as specified in Figure A.2. The excitation is placed perpendicular to the orientation of the waveguide. The distance from the source to the fields to be recorded shall be 1,778 mm. The length of the waveguide should be chosen such that spurious fields that can be caused by the truncation of the computational domain do not reach the region where the fields are recorded.

The walls of the waveguide shall be modelled as conductors with conductivities σ of 10^5 S/m, 10^6 S/m, and 10^7 S/m. The waveguide shall be filled with lossless dielectric materials with relative permittivities ϵ_r of 1 and 2. For each configuration, the waveguide shall be meshed with a fine and a coarse homogeneous or inhomogeneous mesh with at least a minimum mesh step according to Table A.3.

The E_y components at the source location (Figure A.3) shall be excited with the analytical solution of the TE₁₀ mode. The mode can be excited by setting the E_y components at the source location (Figure A.3) to the values computed from Formula (A.1):

$$E_y = E_0 \sin \frac{x\pi}{w} \quad (\text{A.1})$$

where

E_0 is a specifiable amplitude of the electric field vector;

x is the location of the x -component of the electric field vector;

w is the width of the waveguide (7,112 mm).

Alternative methods for the field excitation may be used, such as particular solvers to determine the propagating modes in the waveguide or preconfigured sources if the software provides them. In any case, it shall be asserted that only the fundamental propagating mode exists at the location where the fields are recorded (Figure A.3) because the presence of higher order modes or spurious modes hinders the evaluation of the propagation constant. The E_y component shall be recorded at the locations specified in Figure A.3. The complex propagation constant k_z can be computed from the field components recorded at the locations in Figure A.3 using Formula (A.2)

$$\alpha = \text{Im} \left[-\frac{j}{\Delta s} \ln \frac{E_{10} + E_{12} - \sqrt{-4E_{11}^2 + (E_{10} + E_{12})^2}}{2E_{11}} \right] \quad (\text{A.2})$$

where Δs is the distance between the locations of the recorded components (1,778 mm).

For FDTD, all results shall be evaluated and reported for the waveguide axis oriented along all three axes of the coordinate system, for two different orientations around the waveguide axis (rotate waveguide by 90°). α shall be evaluated for propagation along positive axis direction, only.

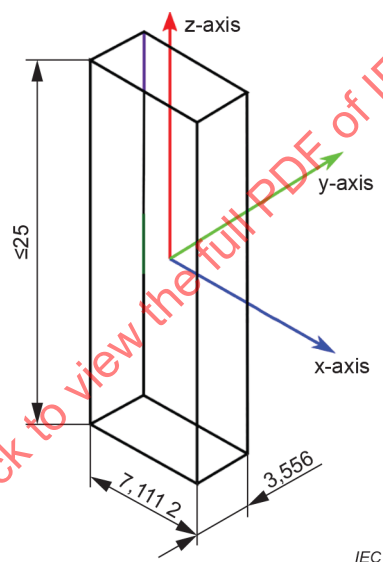
For each waveguide configuration in Table A.4, the maximum deviation of the attenuation constant α from its reference value shall be evaluated as a function of the frequency. Reference values have been derived according to Formula (A.3):

$$\alpha = 8,686 \frac{1}{b\eta} \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}} \frac{\left[1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{f_c}{f} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f} \right)^2}} \quad [\text{dB/m}] \quad (\text{A.3})$$

where

- ω is the angular frequency;
- μ_0 is the free space permeability;
- σ is the conductivity of the waveguide walls;
- a is the waveguide width (also referred to as w);
- b is the waveguide height;
- η is the wave impedance of the dielectric in the waveguide;
- f is the frequency;
- f_c is the cutoff frequency of the waveguide.

The constant 8,686 converts the units of the attenuation coefficient computation results from Np to dB. Further details can be found in [12]. Reference solutions for Table A.4 are given in a separate file (Annex I). The deviations of α from its reference results shall be less than or equal to the tolerances given in Table A.4.



Dimensions in millimetres

Figure A.2 – R320 waveguide

Dimensions in millimetres

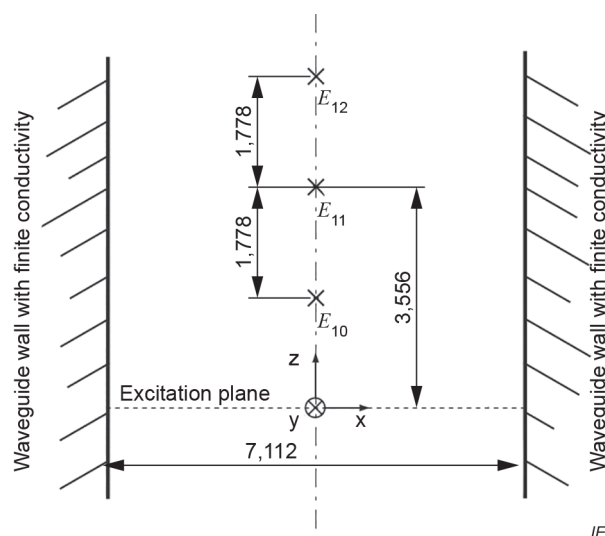


Figure A.3 – Cross section of the R320 waveguide showing the locations of the E_y components to be recorded

Table A.3 – Minimum fine and coarse mesh step for used method

Method	Fine mesh	Coarse mesh
FDTD	0,088 9 mm	0,355 6 mm
FEM, lowest order	0,1 mm	0,3 mm
FEM, second lowest order	0,2 mm	0,5 mm
FEM, third lowest order	0,5 mm	1,0 mm

Table A.4 – Results of the evaluation of the computational dispersion characteristics

Waveguide configuration	Limit for code conformity						
Waveguide axis (direction of propagation) and orientation around waveguide axis (FDTD only)	x						
ε_r		1	2	1	2	1	2
σ [S/m]		10^5	10^5	10^6	10^6	10^7	10^7
maximum deviation of computed α from reference fine mesh	$\pm 10 \%$						
maximum deviation of computed α from reference coarse mesh	$\pm 15 \%$						
The maximum deviation of the computational evaluation shall be evaluated over the entire computed frequency range (25 GHz to 40 GHz).							

A.5 Implementation of anisotropic dielectrics

The evaluation of anisotropic dielectrics shall be carried out using the rectangular R320 waveguide as specified in Clause A.4 and Figure A.2 filled with a uniaxial anisotropic dielectric. The dielectric shall have the following dielectric properties:

- a) $\varepsilon_r = 3,0$, $\sigma = 0,01$ S/m along the x -axis and y -axis, $\varepsilon_r = 1,0$, $\sigma = 0$ along the z -axis;

- b) $\varepsilon_r = 3,0$, $\sigma = 0,01$ S/m along the x -axis and z -axis, $\varepsilon_r = 1,0$, $\sigma = 0$ along the y -axis;
c) $\varepsilon_r = 3,0$, $\sigma = 0,01$ S/m along the y -axis and z -axis, $\varepsilon_r = 1,0$, $\sigma = 0$ along the x -axis.

The waveguide shall be excited with the TE_{10} mode, and the computational propagation constants in the directions of the waveguide axis shall be determined for the configurations a) to c) specified above. The complex computational propagation constant $k_{z,num}$ shall be evaluated according to Formula (20) of IEC/IEEE 62704-1:2017 for FDTD or according to Equation (12) of IEC/IEEE 62704-4:2020 for FEM. Reference results are available as supplemental files; see Annex I.

NOTE The indices of the TE_{10} mode can be different for configuration b) depending on the conventions of the software being validated.

The distance of the locations to record the electric fields in the anisotropic dielectric should be reduced to 1,0 mm. If the waveguide excitation cannot be placed into the anisotropic dielectric, only a section of the waveguide of a minimum length of 5,0 mm shall be filled with the anisotropic dielectric. The excitation may then be placed into a free space section of the waveguide.

The direction of the waveguide axis shall be permuted along the three axes of the coordinate system. In FDTD computations, the anisotropic dielectric shall not be substituted by different isotropic materials applied on the edges of the Cartesian FDTD mesh.

The results computed with the software under test shall be reported in Table A.5.

Table A.5 – Results of the evaluation of the representation of anisotropic dielectrics

Waveguide configuration	Limit for code conformity			
	$x, y, \text{ or } z$	a)	b)	c)
axis, direction of propagation and orientation				
uniaxial dielectric as specified in Clause A.5				
maximum deviation of computed $\text{Re } k_z$ from reference fine mesh	$\pm 5 \%$			
maximum deviation of computed $\text{Im } k_z$ from reference fine mesh	$\pm 10 \%$		n.a. ^a	
maximum deviation of computed $\text{Re } k_z$ from reference coarse mesh	$\pm 10 \%$			
maximum deviation of computed $\text{Im } k_z$ from reference coarse mesh	$\pm 15 \%$		n.a.	
The maximum deviation of the evaluation shall be evaluated over the entire computed frequency range (25 GHz to 40 GHz).				
^a n.a. = not applicable.				

A.6 Computation of the sPD and $psPD$

A.6.1 General

The distribution of the sPD and the $psPD$ shall be evaluated on planar and non-planar evaluation surfaces for averaging areas of 1 cm² and 4 cm². An incident field distribution is specified in terms of the complex Poynting vector in Formula (A.4):

$$\mathbf{S}(x, y, z) = \begin{pmatrix} S_5(x, y) + jS_6(x, y) \\ S_3(x, y) + jS_4(x, y) \\ S_1(x, y) + jS_2(x, y) \end{pmatrix} \exp(-\alpha|z|) \quad (\text{A.4})$$

with

$\alpha = 10 \text{ Np/m}$,

$S_i(x, y)$ as in Formula (A.5) for the parameter sets i of Table A.6.

$$S_i(x, y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_1^2}} \exp\left[-\frac{x^2 - 2\rho_1 xy + y^2}{2\zeta^2(1-\rho_1^2)}\right] + A \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_2^2}} \exp\left[-\frac{(x-d_x)^2 - 2\rho_2(x-d_x)y + y^2}{2\zeta^2(1-\rho_2^2)}\right] \quad (\text{A.5})$$

Figure A.4 shows the distribution of the components of the Poynting vector of Formula (A.4) computed for the six parameter sets of Table A.6 on a surface of 20 cm × 20 cm centred about the origin of the coordinate system.

Table A.6 – Parameters for the incident power density distribution of Formula (A.4)

Parameter set	ρ_1	ρ_2	d_x [m]	A	ζ^2 [m ²]
1	0	0	0	0	0,001
2	0,85	0	0	0	0,001 5
3	0,75	0,98	0,03	0,15	0,002 5
4	0,8	-0,98	0,07	0,1	0,002 5
5	0,08	-0,08	0,07	0,9	0,000 15
6	-0,95	-0,09	0,07	0	0,001

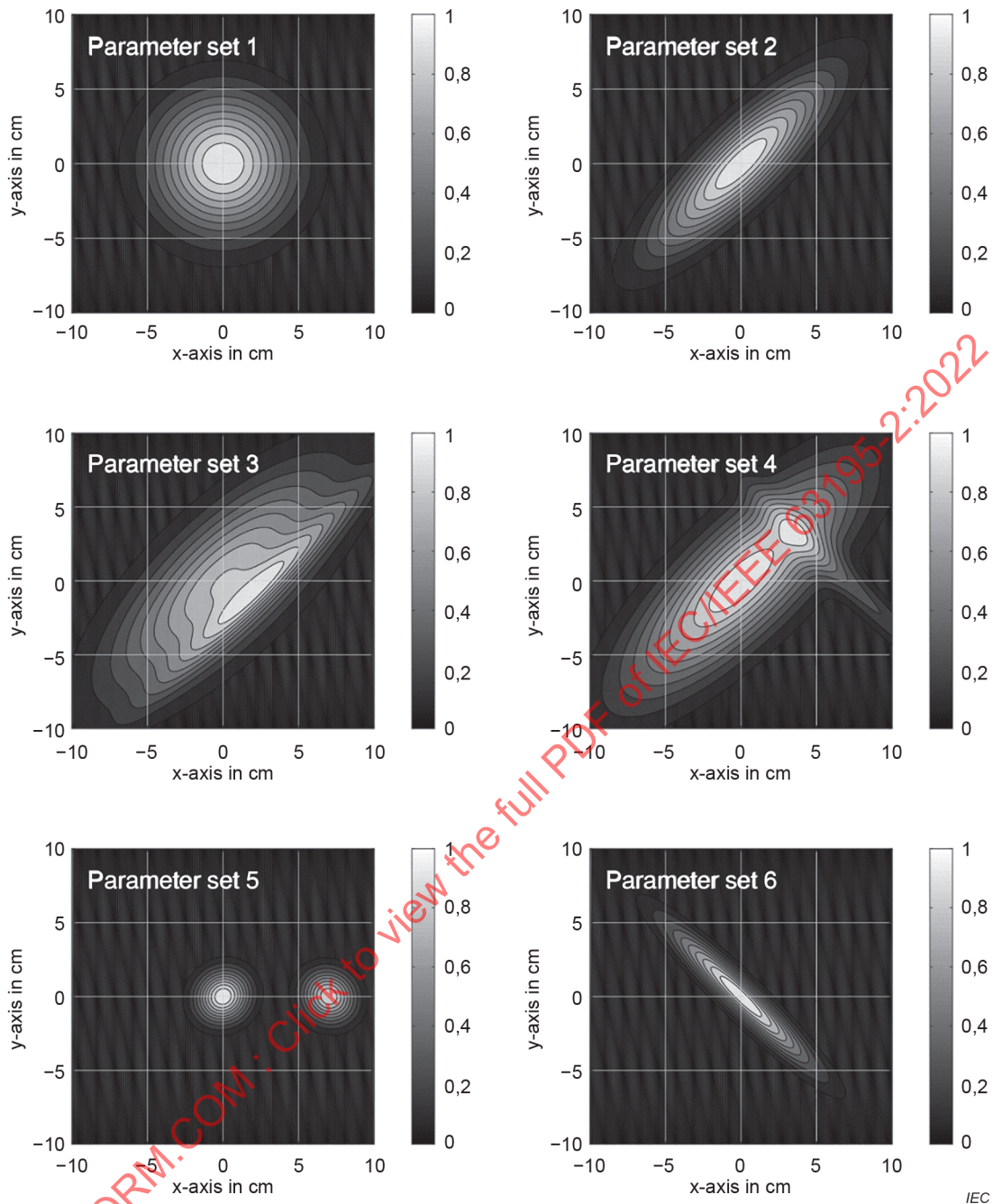


Figure A.4 – $S_i(x,y)$ computed with Formula (A.4) for the six parameter sets of Table A.6 normalized to their maxima

A.6.2 Planar surfaces

For the verification of the implementation of the power density averaging algorithm on planar surfaces (8.4.2.1), the distribution of the sPD shall be evaluated on the vertices of a square evaluation surface of 20 cm × 20 cm centred about the origin using square averaging areas of 1 cm² and 4 cm² as specified in 8.4.2.1. The evaluation surface and coordinates of the vertices for the evaluation of the sPD are given as follows:

- range of the x - and y -axes: –10 cm to 10 cm;
- position on the z -axis: 0;
- mesh step in x -direction: 2,0 mm;
- mesh step in y -direction: 2,0 mm.

The sPD shall be evaluated according to the three definitions of the PD in Formula (4), Formula (5), and Formula (8) for the two averaging areas of 1 cm^2 and 4 cm^2 , i.e. six configurations shall be evaluated. In addition, the $psPD$ shall be reported according to 8.3, 8.4, 8.5, and 8.6. Reference results are available as supplemental files; see Annex I. The maximum permissible deviation of sPD values is 2 % with respect to the $psPD$.

A.6.3 Non-planar surfaces

The distribution of the sPD and the $psPD$ shall be evaluated on the surfaces of four testing geometries; These testing geometries are as follows:

- three modifications of the SAR Star specified in 8.2.4 of IEC/IEEE 62704-1:2017, shown in Figure A.5;
- the modified SAM phantom described in 7.2.4.3 of IEC/IEEE 63195-1:2021.

For the evaluation of the sPD and the $psPD$, triangulated versions of these geometries are available in STL-format as supplemental files; see Annex I. The testing geometries in these files are located at the coordinates for the evaluation with the testing function specified in Formula (A.5).

NOTE The inner structure of the SAR Star of 8.2.4 of IEC/IEEE 62704-1:2017 has been removed because it is not required for power density averaging on the surface.

For the verification of the implementation of the power density averaging algorithm on non-planar surfaces (8.4.2.2), the distribution of the sPD shall be evaluated on the vertices of the triangles of the triangulated version of the outer surface of the testing geometries for averaging areas of 1 cm^2 and 4 cm^2 .

The sPD shall be evaluated according to the three definitions of the PD in Formula (4), Formula (5), and Formula (8) for the two averaging areas of 1 cm^2 and 4 cm^2 ; i.e. six configurations shall be evaluated for each of the four testing geometries. The results of the distribution of the sPD shall be reported according to the file format given in Annex E. Reference results and an evaluation script are available as supplemental files; see Annex I.

The following deviations from the reference results are permitted.

- a) For the SAM phantom and for the SAR Star geometries, the maximum permissible deviation of the $psPD$ from the reference results is 1 %.
- b) For the SAM phantom, the maximum permissible deviation of the sPD from the reference results is 5 % normalized to the $psPD$.
- c) For the SAR Star geometries, the maximum permissible deviation of the sPD from the reference results is 40 % for a maximum of 2 000 vertices and 5 % for the remaining vertices normalized to the $psPD$.

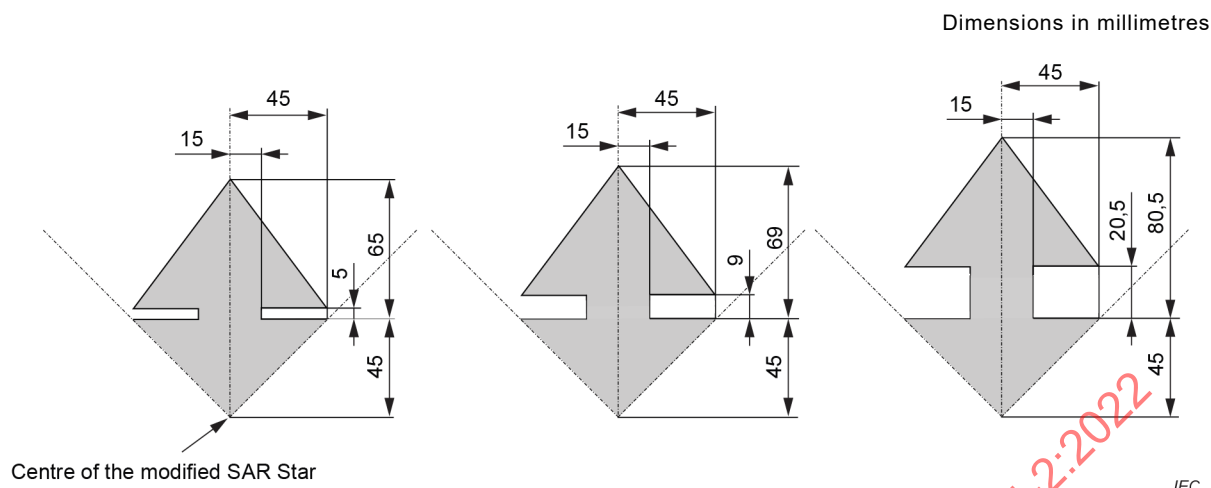


Figure A.5 – Cross sections of the symmetric quarters of the testing geometries (SAR Stars) for the benchmarking of the power density averaging algorithm

The percentage of the deviations shall be computed with respect to the maximum sPD , i.e. the $psPD$ of the respective test cases.

NOTE When an averaging sphere is placed at A_1 or B_1 (see Figure A.6), respectively, the red and blue areas are assumed to be inside that sphere. Determining whether these two areas are connected depends on the computationally unstable decision if point C is inside or outside the sphere. If the decision results in disconnected areas, these are referred to as A_2 and B_2 , which is illustrated in Figure A.6 by a small spatial offset. Regardless of the decision of the averaging algorithm, the sizes of the areas A_2 and B_2 are very similar to those of A_1 and B_1 . Assuming that both areas have an identical sPD , the resulting sPD will be identical to this value regardless of whether they are assumed to be connected or not. Assuming a non-zero value for the sPD of one area and a zero value for the other area, the sPD can vary by 100 % depending on whether the areas are regarded as connected or not and depending on the ratios of the two areas. This variation is relative to the overall maximum, i.e. to the $psPD$, but will never lead to a higher value.

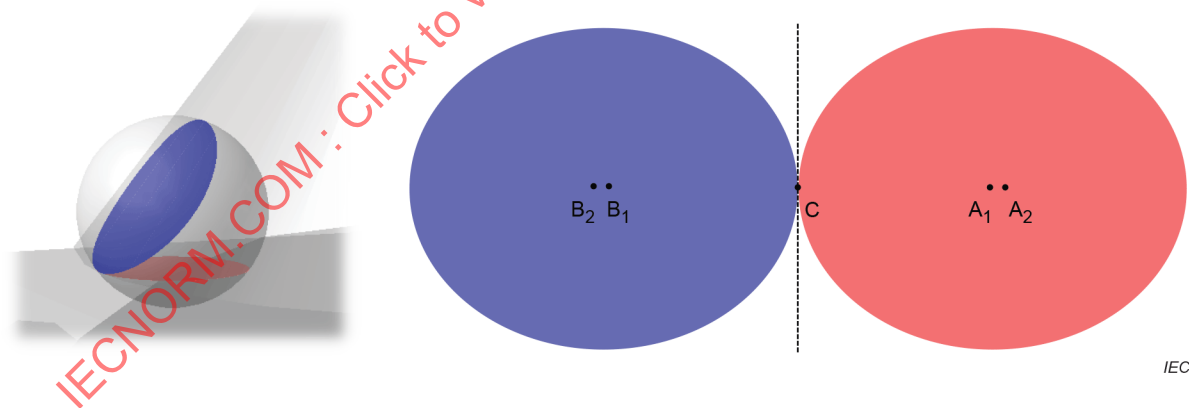


Figure A.6 – Areas for the computation of the sPD on a cone of the SAR Star

A.7 Implementation of the field extrapolation according to the surface equivalence principle

The verification test specified in Clause A.7 applies only to software which computes the electric and magnetic fields outside the computational domain using the surface equivalence principle (8.3).

For the configurations given in Clause A.2, the x -, y -, and z -vector components of the electric fields and magnetic fields shall be computed on a cubical surface with an edge length of 24,0 mm, using the computation results on the surface of a cube with an edge length of 20,0 mm, by applying the surface equivalence principle. Both cubes shall be centred about the origin of the coordinate system. Reference results are available as supplemental files; see Annex I. The maximum deviation of the electric field and magnetic field amplitudes that are greater than or equal to 10 % of the maximum of the reference results shall be evaluated and reported in Table A.1. The maximum permissible deviation from the reference results is 10,0 %.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC/IEEE 63195-2:2022

Annex B (informative)

Experimental evaluation of the radiated power

B.1 General

For the comparison of the electric and/or magnetic fields required for the model validation as described in Clause 7, the measured and computed field components of the DUT are normalized to the same P_R (7.3). This Annex B introduces and compares different experimental methods to determine the P_R of the DUT, such as the measurement of P_M , P_O or the far-field pattern, considering their contributions to the uncertainty. Alternative methods that are not described here may also be applied provided that their contributions to the uncertainty can be quantified. For some applications, different methods may be combined to reduce the overall uncertainty of the evaluation of the radiated power. An overview is given in Table B.1.

**Table B.1 – Comparison of the experimental methods
for the evaluation of the radiated power**

Method	Power reference plane (Figure 2)	Advantages	Disadvantages	Main sources of uncertainty
Conducted power measurement (P_M and P_O)	Source plane or antenna input plane	simple measurement setup generally lower uncertainties	not always possible dielectric and conductive losses in DUT need to be based on additional assumptions	dielectric and conductive losses in DUT
P_R measurement	Near-field or far-field	direct evaluation of the target quantity	complex setup long measurement time	
EIRP measurement	Near-field or far-field	direct evaluation of the target quantity	complex setup additional evaluations required for gain	evaluation of the gain
Information provided by the DUT	none	no measurements required	difficult or impossible traceability	dependent on source of information

B.2 Direct conducted power measurements

The direct measurement of the conducted power (P_M or P_O) in many cases can be the method with the lowest overall contribution to the uncertainty of the evaluation. One of its main advantages is a comparatively simple measurement setup. Its applicability depends on the internal design of the DUT and the accessibility of its respective ports and components. Typically, the transmit chain of a DUT implements two different designs for the frequency conversion, one of which can be applied for conducted power measurements:

- a) DUTs with direct frequency conversion transmit the RF signal from the amplifier module to the antenna array. Such devices might allow access to the RF signal with appropriate measurement equipment and can therefore enable the direct evaluation of P_M or P_O that is fed into the antenna array.
- b) DUTs with intermediate frequency conversion transmit an IF signal to the antenna array. As these devices do not yield direct access to the amplified RF signal, conducted power measurements are not possible. This device design is generally used for antenna arrays with beamforming capability.

Disadvantages of conducted power measurements are the limited availability of appropriate RF connectors for frequencies above 40 GHz, the problem of the quantification of the antenna losses of the DUT and the evaluation of the uncertainties introduced by the RF connection to the measurement setup and differences in matching of the antenna and the measurement equipment. Details are given in 7.3.

B.3 Radiated power measurement methods

The radiated power P_R can be measured directly in the near-field or in the far-field of the DUT. This method requires more complex measurement equipment and can lead to a higher overall uncertainty of the evaluation. There are two options to evaluate P_R from far-field pattern measurements:

- a) For the P_R measurement, the far-field pattern is measured over the entire beam solid angle at an appropriate angular resolution. P_R can be computed directly from the field magnitude at the measured points.
- b) The EIRP measurement evaluates the power only in terms of the maximum antenna gain. P_R can then be computed from Formula (B.1)

$$P_R [\text{dBm}] = \text{EIRP} [\text{dBm}] - D [\text{dBi}] \quad (\text{B.1})$$

where EIRP is the measured EIRP and D is the antenna directivity, which is obtained, for example, by separate computations.

Detailed measurement setups and protocols for the experimental evaluation of the EIRP and the P_R including guidelines for calibration and for the uncertainty evaluation are given in [6]. EIRP and P_R can also be evaluated by computing the far-field pattern from measurements in the near-field. Application of this method can introduce additional uncertainties. Details can also be found in [6].

B.4 Information provided by the DUT

Future wireless devices (5G) might report the available P_R to their network. It might be possible to read this out in a test mode as traceable information with known uncertainty and use it as P_R for model validation.

Annex C (normative)

Maximum-exposure evaluation techniques

C.1 General

The evaluation of the *mpsPD* on the evaluation surface (see 8.3, 8.4, 8.5, 8.6) requires the evaluation of the field amplitudes and phases for all possible antenna configurations of the DUT. For the purposes of this Annex C, the *mpsPD* is determined using Formula (C.1):

$$mpsPD = \max_c \{ psPD(c) \} \quad (C.1)$$

with *c* as the input vector.

NOTE The methods described in Annex C are general and do not refer to a particular codebook with a finite number of input vector entries. Nevertheless, there can be global limits, e.g. for the phase differences among the different vector elements.

The antenna configurations are specified by the amplitudes and phases of the signals fed to the antenna elements. For a small number of antenna configurations, experimental or computational evaluation of each mode may be feasible, such that the *mpsPD* may be determined directly.

In general, the number of antenna configurations can be assumed to be too large, such that field maximization techniques need to be applied to determine the *mpsPD*. These techniques take advantage of the linear superposition principle and require the evaluation of the complex electric and magnetic field vectors radiated by the antenna, the antenna array or sub-array of the DUT. Amplitudes and phases of these individual EM fields need to be known on a surface or in a volume to compute the power density and to average it on the evaluation surface.

The field maximization techniques specified in Annex C apply to both the computational results obtained with the methods in this document and to the experimentally evaluated results carried out according to the measurement procedure specified in 7.4 of IEC/IEEE 63195-1:2021.

C.2 Evaluation of EM fields radiated by each antenna element

EM fields radiated by each antenna element can be obtained by simulating each antenna element according to Clause 7. The same can be obtained experimentally according to 7.4 of IEC/IEEE 63195-1:2021 if it is possible to operate each antenna port of the DUT separately.

If it is not possible to operate the antenna ports of the DUT separately, the fields of each antenna shall be reconstructed from measurements of the fields of *n* linearly independent configurations, where *n* is the number of antenna ports. If it is not possible to preserve the phase reference between measurements for different configurations, an additional measurement (*n* + 1) shall be performed to reconstruct the missing phase information as described in Annex E of IEC/IEEE 63195-1:2021.

C.3 Evaluation of the *mpsPD* by superposition of individual EM fields

C.3.1 General

For the evaluation of the *mpsPD*, the fields evaluated according to Clause C.2 are weighted with individual complex coefficients and superimposed for the computation of the *psPD* according to 8.3, 8.4, 8.5, and 8.6 for a set of individual weighting coefficients. One or more of the maximum-exposure evaluation (MEE) techniques described in C.3.2 through C.3.4 shall be used.

NOTE The weighting coefficients for the *mpsPD* obtained by using optimization or eigenvalue decomposition are not necessarily part of the codebook. Alternative methods can be applied provided they are verified according to Annex H.

C.3.2 Maximization over the entire codebook by exhaustive search

For codebooks of limited size, the *psPD* can be maximized by exhaustive search, evaluating all specified combinations of amplitude and phase. Exhaustive search might be feasible depending on the number of possible combinations of configurations and on the available computational resources. The uncertainty of the evaluation of the *mpsPD* using maximization over the entire codebook can be assumed to be zero.

C.3.3 Optimization with fixed total conducted power

For codebooks with the constraint of a fixed power P_R and different amplitudes and phases at each port, [13] and [14] show that it is possible to find a conservative estimate of the *mpsPD* by eigenvalue decomposition. If applied on the magnitude of the Poynting vector, it is possible to derive an upper bound of the *psPD* which can be overly conservative.

C.3.4 Optimization with fixed power at each port

C.3.4.1 General

In most cases, the DUT does not only limit the total conducted power but also the power at each port. This additional constraint lowers the maximum possible *mpsPD* of the DUT. For codebooks with known constant power and different phase at each port, an approximate solution for the *mpsPD* on the evaluation surface can be found using the methods described in C.3.4.2. Other optimization algorithms may also be used and should be verified according to Annex H.

C.3.4.2 General optimization approach

The objective function for the *mpsPD* as a function of the location on the evaluation surface r and the amplitude and phase configuration vector c of the codebook is given in Formula (C.2):

$$mpsPD = \max_r \left[\max_c \{ psPD(r, c) \} \right] \quad (C.2)$$

The *mpsPD* is maximized using general-purpose optimization methods. If it cannot be demonstrated that the selected method results in a global maximum, several methods shall be applied in parallel. It has been demonstrated that at least one of the following four algorithms is able to find the global maximum [15]:

- a) Nelder-Mead [16];
- b) Powell [17];
- c) BFGS (Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno) [18];
- d) COBYLA [18].

C.3.4.3 Optimization with fixed power at each port, special case of sPD normal to the evaluation surface

It is possible to obtain generalized solutions for the $mpsPD$ without constraints on P_R and fixed power at each port, e.g. uniform port amplitudes, by semidefinite relaxation with power density evaluated using Formula (4) in 8.5.2. Further references are given in [19] and [20].

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC/IEEE 63195-2:2022

Annex D (informative)

Examples of the implementation of power density averaging algorithms

D.1 Example for the evaluation of the *psPD* on a planar surface

D.1.1 General

The averaging area on a planar evaluation surface may be determined using one of the algorithms described in D.1.2 or D.1.3.

D.1.2 Evaluation of the *psPD* by direct construction of the averaging area

The *psPD* may be evaluated by directly constructing the square averaging area on an arbitrarily discretized planar mesh using the following steps.

- a) Specify an empty list of triangles L_T .
- b) Specify a square surface with the edge length $a_{av} = \sqrt{A_{av}}$ at the first vertex of the evaluation surface as centre point. The orientation of the square around the surface normal passing through its centre point is arbitrary with all corner points of the square inside the evaluation surface.
- c) Determine the triangles of the evaluation surface that are completely enclosed by the square. Add them to L_T .
- d) Determine the triangles that intersect the edges of the square. If a corner point of such a triangle is more than $0,2 d_T$ inside the area of the square, intersect the area of the triangle and discard the region outside the square. Triangulate the intersection area inside the square.
- e) Following the specification of the integrands in Formula (4), Formula (5), or Formula (8) in 8.5.2, 8.5.3 or 8.5.4, compute the power for each triangle $P_{T,i}$ that is contained in the list of triangles L_T by interpolating the incident power density $S_{T,i}$ in its geometric centre (centroid) and multiplying it with the area of the triangle $A_{T,i}$. Linear interpolation of the closest electric and magnetic field components of the computational mesh is used to compute $S_{T,i}$.
- f) Compute the *sPD* of the current centre point and the current orientation of the square by dividing the sum of all $P_{T,i}$ of the current centre point by the sum of all $A_{T,i}$ of the current centre point.
- g) Rotate the square by 5° around the surface normal passing through its centre point and return to c). If a corner point of the rotated square is not contained in the evaluation surface, repeat the rotation until the square is entirely contained in the evaluation surface.
- h) When the square has been rotated by 85° from its initial position, compute the *sPD* for the current centre point by dividing the maximum sum of the $P_{T,i}$ of all rotation angles of the current square by the corresponding sum of the areas of all triangles $A_{T,i}$.
- i) Proceed to the next centre point and return to step a). If there are no centre points left on the evaluation surface, proceed to step j).
- j) Report the maximum *sPD* of all centre points as *psPD* of all computed averaging areas.
- k) The vertices of the new triangles that are generated in step d) are not used as additional centre points.

D.1.3 Example for the efficient evaluation of the $psPD$ using an equidistant mesh on the evaluation surface

On an equidistant Cartesian mesh, the $psPD$ may be determined efficiently using the following convolution algorithm. For the evaluation of the $psPD$ on a planar surface, the averaging area is constructed as a square with the edge length $a_{av} = \sqrt{A_{av}}$. The centre point of this square determines the location of the sPD .

For the evaluation of the $psPD$ on a planar surface, the planar surface is subdivided by an equidistant base mesh with a mesh step size of 1 mm or $\lambda/10$, whichever is less. The (un-averaged, equidistant) values $PD(m,n)$ (m,n are discrete indices of the mesh coordinates) are the integrands of Formula (4), Formula (5), or Formula (8) in 8.5.2, 8.5.3, or 8.5.4, respectively. They are computed on the base mesh using linear interpolation of the E and H vector field components. For each mesh cell a corresponding averaging square is constructed. The centre points of the mesh cell and of the square are identical. The square is rotated around its centre point to find the orientation that maximizes the power that passes through the square. The sPD at each centre point of the base mesh is computed according to the following steps.

- Compute the convolution coefficients $C(\alpha, m', n')$ for the averaging area A_{av} for 18 discrete rotation angles $\alpha = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, \dots, 85^\circ$. $C(\alpha, m', n')$ is the area of the intersection of the averaging area rotated by the angle α and the area of the cell with the indices m' and n' of the base mesh. For geometric details see Figure D.1. An example for the area of intersection $C(\alpha, m', n')$ is indicated in red.
- Compute the sPD on the mesh by discrete two-dimensional convolution and evaluation of the maximum of all rotation angles α :

$$sPD(m,n) = \max_{\alpha} \sum_{m',n'} PD(m,n) \times C(\alpha, m' - m, n' - n). \quad (D.1)$$

- Compute the $psPD$:

$$psPD = \max_{m,n} \{sPD(m,n)\}. \quad (D.2)$$

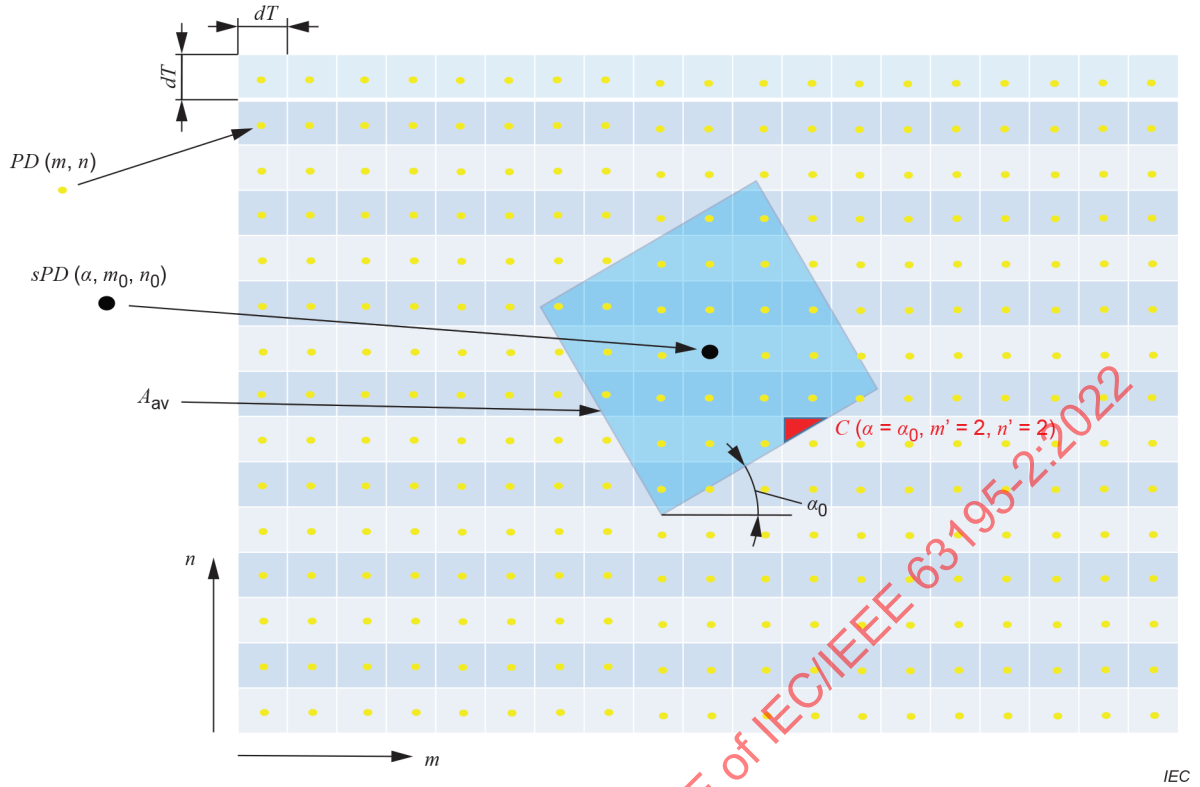


Figure D.1 – Rotated averaging area on the discretized evaluation surface (base mesh)

D.2 Example for the evaluation of the $psPD$ on a non-planar surface

The averaging area on a non-planar evaluation surface may be determined using the following algorithm.

- Specify an empty list of triangles L_T .
- Specify a sphere with the first vertex of the evaluation surface as centre point. The radius of the sphere is $r_{av} = \sqrt{A_{av}/\pi}$.
- Determine the triangles of the evaluation surface that are completely enclosed by the sphere. Add those triangles to L_T that are connected to the triangles that contain the centre point via other triangles that are located completely inside the sphere. Triangles are connected if they share a vertex (8.4.2.2).

NOTE This step avoids using triangles not contributing to the centre vertex; e.g. if a sphere centred at one finger of the hand also intersects another finger.

- Determine the triangles that intersect the surface of the sphere and the intersection points of their edges with the surface of the sphere. Determine the triangles specified by these intersection points and the corner points of the triangles of the evaluation surface. If the geometric centres (centroids) of these triangles are inside the sphere, add the triangles to L_T . To accelerate the convergence of the results when refining the mesh, the area of the triangles which are partially included in the sphere and the centroids of which are inside the sphere may be reduced as illustrated in Figure D.2.
- For each triangle in L_T , determine the normal vector n_A of its surface pointing into the evaluation surface, i.e. into the region of the computational space that does not contain the DUT.
- For each triangle in L_T , determine the direction of the Poynting vector at its geometric centre (centroid).

- g) Following the specification of the integrands in Formula (4), Formula (5), or Formula (8) in 8.5.2, 8.5.3 or 8.5.4, compute the power for each triangle $P_{T,i}$ that is contained in the list of triangles L_T by interpolating the incident power density $S_{T,i}$ in its geometric centre (centroid) and multiplying it with the area of the triangle $A_{T,i}$. Linear interpolation of the closest electric and magnetic field components of the computational mesh is used to compute $S_{T,i}$.
- h) Compute sPD for the current centre point by dividing $P_{T,i}$ by the sum of the areas of all triangles $A_{T,i}$.
- i) Proceed to the next centre point and return to step a). If there are no centre points left on the evaluation surface, proceed to step j).
- j) Report the maximum sPD of all centre points as $psPD$ of all computed averaging areas.
- k) The vertices of the new triangles that are generated in step d) are not used as additional centre points.

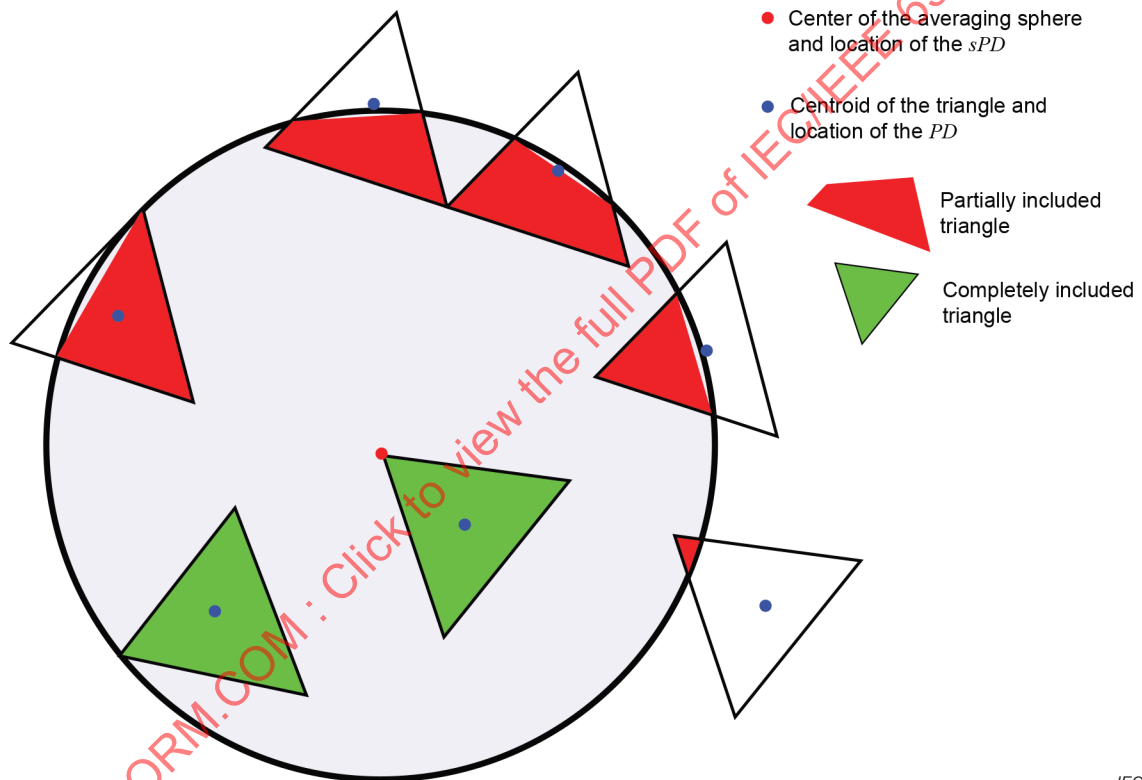


Figure D.2 – Reduction of the area of triangles that are partially included in the averaging sphere

Annex E (informative)

File format for exchange of field data

The file format for data exchange is HDF5. Quantities to be stored are electric field vector, magnetic field vector, the local Poynting vector and sPD . Volumetric data are stored in three-dimensional arrays on Cartesian meshes or as one-dimensional arrays on irregularly spaced meshes. Data on a surface are stored in two-dimensional arrays on Cartesian, cylindrical or spherical meshes or as one-dimensional arrays on irregularly spaced meshes. The arrays or lists of values store the vector components of the fields as complex single precision floating point numbers for E , H and the Poynting vector, and as real single precision floating point numbers for sPD . All quantities should be stored in SI units. Other units should be documented appropriately.

The coordinates of the field values are specified in lists of values for each mesh axis or list of field values. The electric field vector, the magnetic field vector, the local Poynting vector and sPD are stored as values on the vertices of the mesh. If the field components of the original computational mesh are stored (e.g. the components on the edges of the staggered FDTD mesh or the components of the edges of the tetrahedra of the FEM mesh), separate coordinate lists should be specified for each component.

Each file should store only one quantity. The quantity and its associated coordinates should be specified by the labels of the respective datasets. Like this, the contents of the files may be:

- electric field vector, magnetic field vector, Poynting vector or sPD on the vertices of a Cartesian mesh or an irregular mesh:

```
ex_vertex or hx_vertex or px_vertex or spd_vertex
ey_vertex or hy_vertex or py_vertex
ez_vertex or hz_vertex or pz_vertex
x_axis_vertex
y_axis_vertex
z_axis_vertex
```

- electric field vector or magnetic field vector on the edges of a Cartesian mesh or an irregular mesh:

```
ex_edge or hx_edge
ey_edge or hy_edge
ez_edge or hz_edge
x_axis_x_edge
y_axis_x_edge
z_axis_x_edge
x_axis_y_edge
y_axis_y_edge
z_axis_y_edge
x_axis_z_edge
y_axis_z_edge
z_axis_z_edge
```

- electric field vector or its magnitude or modulus on the surface of the beam solid angle in spherical coordinates:

```
ephi_vertex or hphi_vertex or emodulus_vertex or hmodulus_vertex
etheta_vertex or htheta_vertex
er_vertex or hr_vertex
phi_axis_vertex or theta_axis_vertex
```

- *sPD* for the verification of the power density averaging according to Clause A.6:

```
x_axis_vertex  
y_axis_vertex  
z_axis_vertex  
spd_vertex
```

NOTE The locations of the vertices are the geometrical centres of the triangles of the triangulated evaluation surface.

For Cartesian meshes, the datasets for the field quantities are three-dimensional arrays. For irregular meshes, the datasets for the field quantities are one-dimensional arrays. The datasets for the axes are one-dimensional arrays.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC/IEEE 63195-2:2022

Annex F (informative)

Rationales of the methods applied in IEC/IEEE 63195-1 and this document

F.1 Frequency range

IEC/IEEE 63195-1 and this document 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 evaluating the exposure based on the evaluation of the incident power density or the Poynting vector in free space can be necessary (F.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 IEC/IEEE 63195-1 and this document can be specified as equal to the upper limit of the exposure guidelines [7], [8]. Provided that the measurement equipment is specified for frequencies up to 300 GHz, the methods described in IEC/IEEE 63195-1 and this document can be applied up to this frequency. No particular considerations are required for the computational techniques if they fulfil the requirements of Clause 5.

F.2 Computation of sPD

F.2.1 Application of the Poynting vector for computation of incident power density

Like the SAR limits for frequencies up to 6 GHz, the new basic restrictions 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 evaluation 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 evaluation of the absorbed or epithelial power density in body tissue is currently being considered within the framework of a new standard or amendments to IEC/IEEE 63195-1 and this document. The development of these evaluation procedures will presumably take at least two years from the publication of IEC/IEEE 63195-1 and this document.

The exposure guidelines [7] and [8] 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, [7] 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 in comparison to perpendicular incidence (TEM-polarization) occurs for TM-polarized waves at the Brewster angle [21], [22], [23]. The resulting increase in absorption can be considered by including all three vector components of the propagating part of the Poynting vector into the computation of the incident power density. Reference [24] demonstrates for a set of canonical antennas that power density transmitted into the skin can be conservatively evaluated for frequencies above 10 GHz if the computation of the incident power density also considers the imaginary parts of the Poynting vector, i.e. exposure in the reactive near-field.

Additional research has been carried out, investigating 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 [25].

The observations of [7] regarding exposure in the near-field, as well as the conclusions of [25], have been considered. Given the continued research and refinement of the dosimetric evaluation of basic restrictions at millimetre wave frequencies, this document includes three different expressions for the computation of the sPD that all converge to a conservative evaluation of induced temperature increase in body tissue when exposures approach far-field conditions with normal incidence:

- a) surface normal propagating power density directed into the evaluation surface (8.5.2), which considers the real part of the surface normal component of the Poynting vector orientated towards the inside of the evaluation surface (see 8.1);
- b) total propagating power density directed into the evaluation surface (8.5.3), 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 [21], [22], [23];
- c) total power density directed into the evaluation surface considering near-field exposure (8.5.4), which considers the real and the imaginary parts of the three components of the Poynting vectors, yielding a conservative estimate in the reactive near-field region [24].

F.2.2 Averaging area

According to the ICNIRP and IEEE ICES 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 the square shape, including the subsequent requirement for search of the exposure maximum by rotating the square, is straightforward and can be implemented in a computationally efficient way. On curved surfaces, such as those of the human body (e.g. SAM shape for exposure of the head), there is no unambiguous definition of how to map a square shape to the surface in such a way that all its geometrical characteristics are retained. The mapping and the subsequent maximum search 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 evaluation standards, including the time available for the implementation and testing of the averaging algorithms, it was decided to use the square shape only for planar evaluation surfaces. On curved surfaces, the averaging area is 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.

Annex G (informative)

Square averaging area on non-planar evaluation surfaces

G.1 General

For the evaluation of the sPD on a non-planar evaluation surface using square-shaped averaging area, averaging areas may be constructed around each centre point on the evaluation surface with the help of a cube of a fixed edge length $a_c = \sqrt{A_{av}}$. The intersection between the cube and the evaluation surface forms a smaller surface S_{av} . The averaging area is then established by the component of S_{av} that is directly connected to the centre point.

NOTE The resulting averaging area will not be a square unless the evaluation surface is planar.

G.2 Example implementation for the evaluation of the $psPD$ on a non-planar surface using square-shaped averaging area

For all centre points:

- a) find the plane tangent to the evaluation surface at the centre point;
- b) build a cube with its axes aligned to the plane;
- c) for each rotation angle $\alpha = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, \dots, 85^\circ$,
 - 1) rotate the cube by α around the cube axis that is normal to the tangent plane,
 - 2) find the intersection between the evaluation surface and the cube, and
 - 3) compute the sPD on the evaluation surface, e.g. by adapting the procedure described in Clause D.2.

The implemented algorithm and its validation should be well documented.

Annex H (informative)

Validation of the maximum-exposure evaluation techniques

H.1 General

The maximum-exposure evaluation techniques should be validated using a testing device with well-specified source(s) with n independent antenna elements but no less than $n = 16$. The testing device should indicate the location of an acoustic output and vertical and horizontal centre lines [9] to place it at the virtual SAM phantom as described in 7.2.4.3 of IEC/IEEE 63195-1:2021.

An example is the 16-port source with a codebook of 55 configurations and with an infinite codebook, described in Clause H.3. The *mpsPD* should be evaluated on three flat surfaces (2 mm, 5 mm, 10 mm) as well as on the surface of the virtual SAM phantom in "touch" and "tilt" positions [9]. The results should be compared with established target values or generated and verified results using other techniques and/or approaches as the applied maximum-exposure evaluation techniques. The validation may be performed and documented by the manufacturer or any third party whenever the software and hardware (in case of computational techniques) are modified.

H.2 Validation of the exhaustive search

H.2.1 Validation of the exhaustive search

The *mpsPD* computed according to C.3.2 should be compared with a reference source, e.g. [15]. The computed *mpsPD* should be within the uncertainty budget of the reference solution.

H.2.2 Validation using reconstruction method

The reconstruction algorithm used in Clause C.2 should be verified by using synthetic data. Combined EM fields from known individual EM fields should be used as input to the reconstruction algorithm. The resulting individual EM fields should be within an acceptable tolerance from the known initial individual EM fields. The effect of measurement noise should be appropriately considered.

H.2.3 Validation of optimization with fixed total conducted power or with fixed power at each port

The *mpsPD* computed according to Clause C.3 for a large or infinite codebook by optimization techniques should be validated according to one of the following alternatives.

- It should be systematically larger than or equal to the *mpsPD* computed by an exhaustive search approach for a small subset of configurations of the same codebook, e.g. the codebook of the 60 configurations described in [15].
- It should be systematically larger than or equal to the *mpsPD* computed by evaluating 10 000 random configurations.

H.2.4 Validation of the maximum-exposure evaluation of measurement results

The entire evaluation should be performed using at least one well-specified source with more than four independent elements (n) and a codebook that is larger than 20, e.g. [15]. The target values of the source under test should be available with a known uncertainty less than 1,5 dB. A number of measurements of $(n + 1)$ should be performed meeting the requirements of the system manufacturer. The *mpsPD* should be determined and compared with the target values whereas the deviation should not be larger than the combined uncertainty of the evaluation and source.

H.3 Example validation source for maximum-exposure evaluation validation

H.3.1 Description

The antenna array has 4×8 rectangular patch antennas connected by pairs via microstrip lines to form a 2×8 beamforming array. The substrate has a relative permittivity of 3,55, and negligible losses.

The antenna is mounted into a polypropylene structure with relative permittivity 2,1, and a conductivity of 0,062 S/m. The main dimensions for the antenna array and mounting structure are shown in Figure H.1 and Figure H.2, respectively. Their dimensions are given in Table H.1 and Table H.2.

Table H.1 – Main dimensions for the patch array stencil

Stencil length	Stencil width	Stencil thickness	Number of patches along x	Number of patches along y	Patch width	Microstrip length	Patch separation along x	Patch separation along y
S_x	S_y				w	L	d_x	d_y
[mm]	[mm]	[mm]			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
$42,3 \pm 0,01$	$47 \pm 0,01$	$0,8 \pm 0,01$	8	8	$2,7 \pm 0,01$	$2,65 \pm 0,01$	$2,4 \pm 0,015$	$2,75 \pm 0,015$

Table H.2 – Main dimensions of the validation device

Device width	Device length	Device thickness	Adapter length	Adapter width	Gap along x	Gap along y	Distance of the acoustic reference point from the top edge
L_x	L_y		C_x	C_y	D_x	D_y	E_y
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
$71 \pm 0,2$	$142 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,2$	$85 \pm 0,1$	$84 \pm 0,1$	$13 \pm 0,2$	$12 \pm 0,2$	$8,75 \pm 0,1$

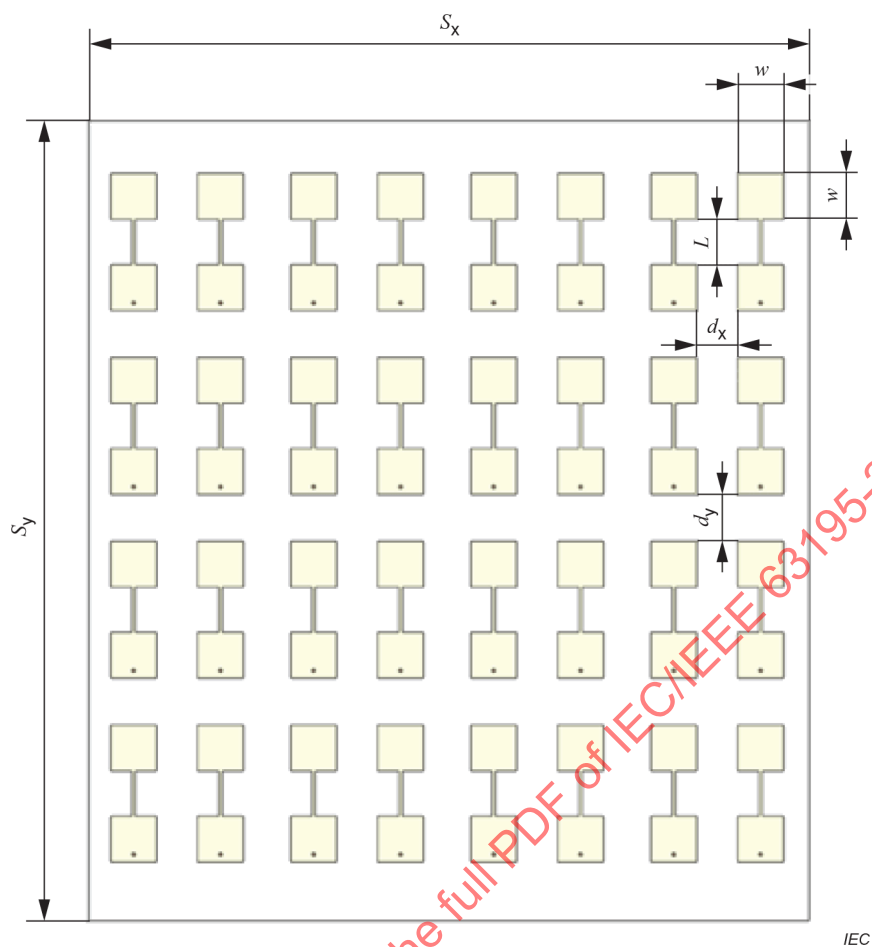
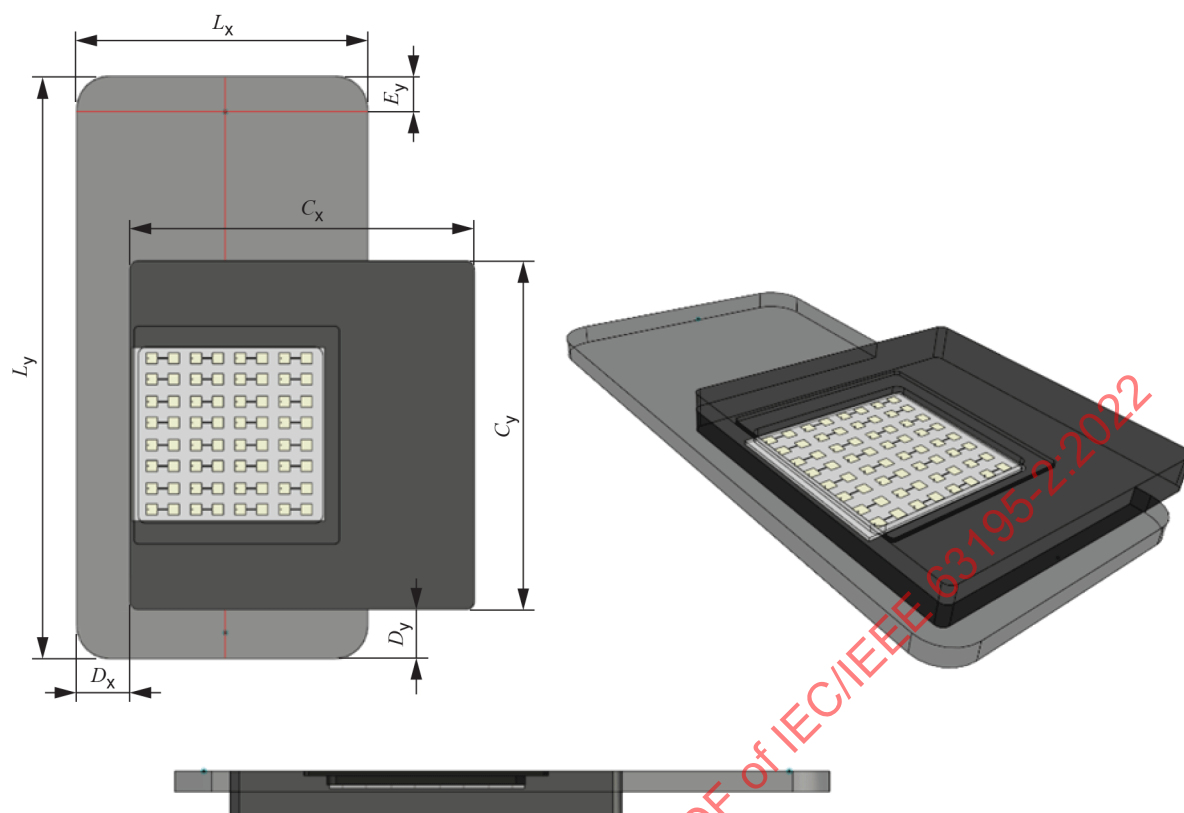


Figure H.1 – Main dimensions of patch array stencil



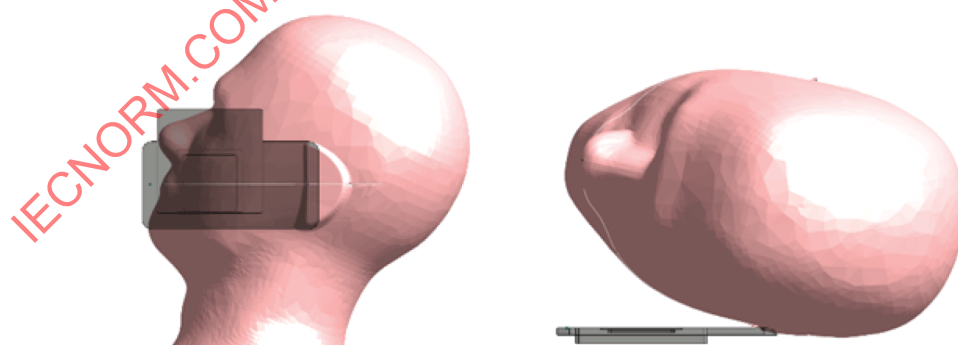
IEC

NOTE The red lines are the vertical and horizontal centre lines with the acoustic reference point at the crossing of the two lines (Figure H.1).

Figure H.2 – Main dimensions of the validation device, including polypropylene casing

H.3.2 Positioning

The device is positioned with respect to the virtual SAM head according to [9]. The tilt and touch positions are also illustrated in Figure H.3 and Figure H.4, respectively.



IEC

Figure H.3 – Validation device with SAM head in the tilt position

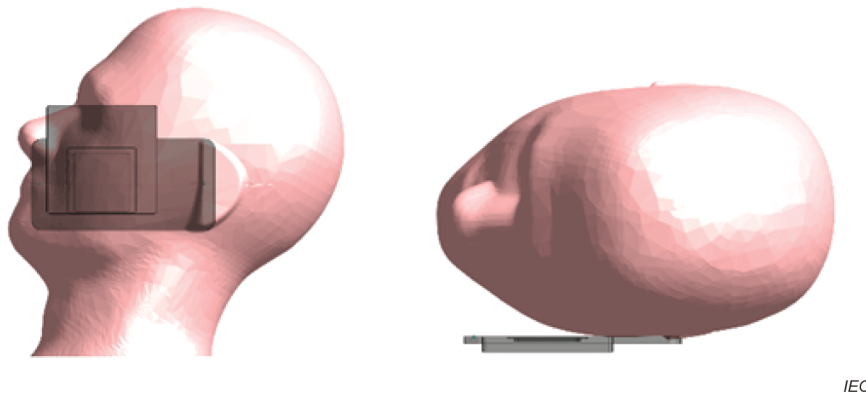


Figure H.4 – Validation device with SAM head in the touch position

H.3.3 Nominal codebook, uncertainty and conducted power P_R

The beam formed by the phased array antenna is controlled by applying a constant phase shift in the feed excitation source of the individual elements. The following codebook applies.

- In the azimuthal direction, the phase shift can take the following values:
 $-60^\circ, -48^\circ, -36^\circ, -24^\circ, -12^\circ, 0^\circ, 12^\circ, 24^\circ, 36^\circ, 48^\circ, 60^\circ$.
- In the elevation direction, the phase shift can take the following values:
 $-10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$.
- Both directions can be controlled independently, which leads to 55 possible configurations.

For each configuration, the uncertainty in the phase value by which each radiating element is excited is assumed to be $\pm 1^\circ$.

The total conducted power is 0 dBm.

H.3.4 Target values

Table H.3 and Table H.4 provide the target values for the *mpsPD* of the beamforming validation device specified in H.3.1 obtained according to the field maximization methods described in Annex C.

Table H.3 shows the target values when the *mpsPD* is evaluated with respect to the nominal codebook specified in H.3.3. The method used is the exhaustive search method. For flat surfaces, target values are also shown assuming an uncertainty of $\pm 1^\circ$ per element. The method used in this case is the global optimization method described in C.3.2 with rectangular constraints of $\pm 1^\circ$ for each configuration of the codebook.

Table H.4 shows the target values when the *mpsPD* is evaluated with respect to an "infinite" codebook, where the phases applied to each individual element can take any value. The method used is the global optimization method described in C.3.2.

The *mpsPD* target values are shown for five different evaluation surfaces:

- flat planes at distances of $d = 2$ mm, 5 mm, and 10 mm;
- the left side of the outer shell of the SAM head in the touch position;
- the left side of the outer shell of the SAM head in the tilt position.

For planar evaluation surfaces, the maximum peak spatial-average power density is computed for square averaging areas of 1 cm^2 and 4 cm^2 area following the procedure described in 8.4.2.1.

For the SAM head, which is non-planar, the maximum peak spatial-average power values are computed for circular averaging areas of 1 cm² and 4 cm² area, following the procedure described in 8.4.2.2.

In all cases, the three variants $mpsPD_{n+}$, $mpsPD_{tot+}$, and $mpsPD_{mod+}$ are computed, as described in 8.5 and Annex C.

Table H.3 – Target values for validation device with the nominal codebook

Surface	Phase uncertainty	1 cm ² averaging area			4 cm ² averaging area		
		$mpsPD_{n+}$ [W/m ²]	$mpsPD_{tot+}$ [W/m ²]	$mpsPD_{mod+}$ [W/m ²]	$mpsPD_{n+}$ [W/m ²]	$mpsPD_{tot+}$ [W/m ²]	$mpsPD_{mod+}$ [W/m ²]
2 mm z+ plane	none	0,57	0,71	0,79	0,45	0,55	0,61
	±1° per element	0,58	0,73	0,81	0,45	0,55	0,62
5 mm z+ plane	none	0,50	0,56	0,61	0,41	0,45	0,49
	±1° per element	0,51	0,58	0,62	0,41	0,46	0,50
10 mm z+ plane	none	0,49	0,50	0,52	0,39	0,40	0,41
	±1° per element	0,50	0,52	0,54	0,39	0,40	0,41
SAM tilt	none	0,39	0,49	0,49	0,31	0,38	0,38
SAM touch	none	0,44	0,53	0,57	0,37	0,41	0,44

Table H.4 – Target values for validation device with infinite codebook

Surface	1 cm ² averaging area			4 cm ² averaging area		
	$mpsPD_{n+}$ [W/m ²]	$mpsPD_{tot+}$ [W/m ²]	$mpsPD_{mod+}$ [W/m ²]	$mpsPD_{n+}$ [W/m ²]	$mpsPD_{tot+}$ [W/m ²]	$mpsPD_{mod+}$ [W/m ²]
2 mm z+ plane	1,43	1,94	2,38	0,70	1,48	1,25
5 mm z+ plane	1,64	2,13	2,39	0,79	1,29	1,13
10 mm z+ plane	1,71	2,27	2,30	0,77	1,20	1,03
SAM tilt	2,24	2,21	2,32	0,87	0,98	0,91
SAM touch	1,69	2,19	2,17	0,71	0,98	1,09

Annex I (normative)

Supplemental files and their checksums

The supplemental files of this document contain:

- the reference results for code verification according to Annex A;
- the verification script for Clause A.6;
- the modified version of the inner shell of the SAM) phantom (8.1).

They are provided for download under the following weblinks:

<https://www.iec.ch/tc106/supportingdocuments>

<https://standards.ieee.org/downloads.html>

For verification of the downloaded files, SHA-256 hashes are provided. The supplemental files shall be verified with these hashes after download. Information on SHA-256 hashes and a list of free implementations of the algorithm to verify the downloaded files is available under [26].

The supplemental files and their SHA-256 hashes are:

Filename:	Reference_Results_IEC_IEEE_63195-2_2021.7z
SHA-256:	71119f3921a22ae9386d514d4417ae48df470de8152e12fc12183986a9e94b6e
Filename:	Verification_Script_A_6_3_IEC_IEEE_63195-2_2021.7z
SHA-256:	e4603236ed296d056d562aa7136e51046b9a8eb3194cb6f0f9fef7c5e6c496a8
Filename:	mmWaveSAM.7z
SHA-256:	4a6a4c17dca1eb8ce830401fce30abced5c49003fdffb78f00e72bd448943e5a

Bibliography

- [1] Schelkunoff, S. A., "Some equivalence theorems of electromagnetics and their application to radiation problems," *The Bell System Technical Journal*, Vol 15, No. 1, pp. 92-112, 1936
- [2] 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*
- [3] Campo, M. A., Blanco, D., Bruni, S., Neto, A., and Llombart, N., "On the use of fly's eye lenses with leaky-wave feeds for wideband communications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 68, No. 4, pp. 2480-2493, 2020
- [4] Siegbahn, M., Bit-Babik, G., Keshvari, J., Christ, A., Derat, B., Monebhurrin, V., Penney, C., Vogel, M. and Wittig, T., "An international interlaboratory comparison of mobile phone SAR calculation with CAD-based models," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 52, No. 4, pp. 804-811, 2010
- [5] IEC/IEEE 62704-3:2017, *Determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human body from wireless communications devices, 30 MHz to 6 GHz – Part 3: Specific requirements for using the finite difference time domain (FDTD) method for SAR calculations of mobile phones*
- [6] 3GPP TR 38.810 V16.2.0, *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on test methods for new radio; (Release 15)*, 3GPP, 650 Route des Lucioles, Sophia Antipolis, Valbonne, France. 2019
- [7] ICNIRP, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz), *Health Physics*, Vol. 118, No. 5, pp. 483-524, 2020
- [8] IEEE Std C95.1-2019, *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz – 300 GHz*
- [9] 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)*
- [10] IEC TR 62630:2010, *Guidance for evaluating exposure from multiple electromagnetic sources*
- [11] Harrington, R. F., *Field computation by moment methods*, Wiley, 1993
- [12] Balanis, C. A., *Advanced engineering electromagnetics*, Wiley, 2010
- [13] Xu, B., Gustafsson, M., Shi, S., Zhao, K., Ying, Z., and He, S., *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
- [14] Neufeld, E., Gosselin, M. C., Murbach, M., Christ, A., Cabot, E., and Kuster, N. Analysis of the local worst-case SAR exposure caused by an MRI multi-transmit body coil in anatomical models of the human body, *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 56, No. 15, pp. 4649-4659, 2011

- [15] Reboux, S., Pfeifer, S., and Kuster, N., 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, 2020
- [16] Gao, F., and Han, L., Implementing the Nelder-Mead simplex algorithm with adaptive parameters, *Computational Optimization and Applications*, Vol. 51, No. 1, pp. 259-277, 2017
- [17] Powell, M. J. D., An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives, *Computer Journal*, No. 7, Vol. 2, pp. 155-162, 1964
- [18] Fletcher, R., *Practical methods of optimization*, Wiley, 1987
- [19] Xu, B., Gustafsson, M., Shi, S., Zhao, K., Ying Z., and He S., Radio frequency exposure compliance of multiple antennas for cellular equipment based on semidefinite relaxation, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 61, No. 2, pp. 327-336, 2018
- [20] Goemans, M. X., and Williamson, D. P., Improved approximation algorithms for maximum cut and satisfiability problems using semidefinite programming, *Journal of the ACM*, Vol. 42, No. 6, pp. 1115-1145, 1995
- [21] Li, K., Sasaki, K., Watanabe, S., and Shirai, H., 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*, Vol. 64, No. 6, p. 065016, 2019
- [22] Samaras, T., and Kuster, N., 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*, Vol. 40, No. 2, pp. 136-139, 2019
- [23] Christ, A., Samaras, T., Neufeld, E., and Kuster, N., Transmission coefficient of power density into skin tissue between 6 and 300 GHz, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 192, No. 1, pp. 113-118, 2020
- [24] Christ, A., Samaras, T., Neufeld, E., and Kuster, N., Limitations of Incident Power Density as a Proxy for Induced Electromagnetic Fields, *Bioelectromagnetics*, Vol. 41, No. 5, pp. 348-359, 2020
- [25] IEEE P2889™, Approved Draft IEEE Guide for the Definition of Incident Power Density to Correlate Surface Temperature Elevation, August 2021
- [26] Wikipedia contributors, *SHA-2* – Wikipedia, The Free Encyclopedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/SHA-2>, online, accessed 2021-01-05

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	80
INTRODUCTION.....	83
1 Domaine d'application	84
2 Références normatives	84
3 Termes et définitions	85
3.1 Paramètres et indicateurs d'exposition	85
3.2 Paramètres spatiaux, physiques et géométriques associés aux indicateurs d'exposition	87
3.3 Paramètres techniques de fonctionnement et d'antenne du dispositif d'essai	88
3.4 Paramètres de calcul	89
3.5 Paramètres d'incertitude	89
4 Symboles et termes abrégés	90
4.1 Symboles.....	90
4.1.1 Grandeurs physiques.....	90
4.1.2 Constantes	90
4.2 Termes abrégés.....	91
5 Vue d'ensemble et application du présent document.....	91
5.1 Vue d'ensemble de l'évaluation numérique.....	91
5.2 Application du présent document	92
5.3 Conditions	93
6 Exigences relatives au logiciel numérique	93
7 Développement et validation du modèle	95
7.1 Généralités	95
7.2 Développement du modèle numérique du DUT	95
7.3 Normalisation de la puissance	96
7.4 Exigences relatives à l'équipement d'essai expérimental pour la validation du modèle.....	97
7.4.1 Généralités.....	97
7.4.2 Conditions ambiantes et support de dispositif	98
7.4.3 Mesure de la puissance	98
7.5 Configurations d'essai pour la validation du modèle du DUT	99
7.5.1 Généralités.....	99
7.5.2 Essais à réaliser.....	99
7.5.3 Détermination de la validité du modèle du DUT	100
7.5.4 Réduction des essais pour les DUT supplémentaires.....	100
8 Calcul et moyennage de la densité de puissance.....	101
8.1 Surface d'évaluation	101
8.2 Essais à réaliser et configurations du DUT.....	101
8.2.1 Généralités.....	101
8.2.2 Dispositifs avec un élément rayonnant unique ou avec plusieurs éléments qui ne fonctionnent pas simultanément	102
8.2.3 Dispositifs avec des réseaux ou sous-réseaux d'antenne.....	102
8.2.4 Dispositifs avec plusieurs antennes ou plusieurs émetteurs	103
8.3 Considérations relatives à la surface d'évaluation et aux dimensions du domaine de calcul	104
8.4 Moyennage de la densité de puissance sur une surface d'évaluation	104
8.4.1 Généralités.....	104

8.4.2	Construction de la zone de moyennage sur une surface d'évaluation.....	105
8.5	Calcul de la sPD par intégration du vecteur de Poynting.....	106
8.5.1	Généralités.....	106
8.5.2	Densité de puissance dans la direction de propagation de la normale à la surface dans la surface d'évaluation, sPD_{n+}	106
8.5.3	Densité de puissance de propagation totale dans la surface d'évaluation, sPD_{tot+}	107
8.5.4	Densité de puissance totale dirigée vers le fantôme en tenant compte de l'exposition dans le champ proche, sPD_{mod+}	107
8.6	Logiciel.....	108
9	Evaluation de l'incertitude.....	108
9.1	Généralités.....	108
9.2	Incertitude de la sPD et de la $mpsPD$ due aux paramètres de calcul.....	109
9.2.1	Contributions à l'incertitude dues aux paramètres de calcul.....	109
9.2.2	Résolution du maillage.....	109
9.2.3	Conditions aux limites absorbantes.....	110
9.2.4	Bilan de puissance.....	110
9.2.5	Troncature du modèle.....	110
9.2.6	Convergence.....	111
9.2.7	Propriétés diélectriques.....	112
9.2.8	Conducteurs avec pertes.....	112
9.3	Contribution à l'incertitude de la représentation par calcul du modèle du DUT	112
9.4	Incertitude de l'évaluation de l'exposition maximale.....	113
9.5	Bilan d'incertitude.....	113
10	Rapport.....	114
Annexe A (normative)	Vérification des codes.....	116
A.1	Généralités.....	116
A.2	Interpolation et superposition des composantes des champs vectoriels.....	116
A.3	Calcul du diagramme de champ lointain et de la puissance rayonnée.....	118
A.4	Mise en œuvre des conducteurs avec pertes.....	118
A.5	Mise en œuvre des éléments diélectriques anisotropes.....	122
A.6	Calcul de la sPD et de la $psPD$	123
A.6.1	Généralités.....	123
A.6.2	Surfaces planes.....	124
A.6.3	Surfaces non planes.....	125
A.7	Mise en œuvre de l'extrapolation de champ selon le principe de l'équivalence des surfaces.....	127
Annexe B (informative)	Evaluation expérimentale de la puissance rayonnée.....	128
B.1	Généralités.....	128
B.2	Mesures directes de la puissance conduite.....	128
B.3	Méthodes de mesure de la puissance rayonnée.....	129
B.4	Informations fournies par le DUT.....	129
Annexe C (normative)	Techniques d'évaluation de l'exposition maximale.....	130
C.1	Généralités.....	130
C.2	Evaluation des champs EM rayonnés par chaque élément d'antenne.....	130
C.3	Evaluation de la $mpsPD$ par superposition des différents champs EM.....	131
C.3.1	Généralités.....	131
C.3.2	Maximisation sur l'ensemble de la liste de codage par recherche exhaustive.....	131

C.3.3	Optimisation avec une puissance totale conduite fixe	131
C.3.4	Optimisation avec une puissance fixe à chaque accès	131
Annexe D (informative)	Exemples de mise en œuvre des algorithmes de moyennage de la densité de puissance	133
D.1	Exemple d'évaluation de la $psPD$ sur une surface plane	133
D.1.1	Généralités	133
D.1.2	Evaluation de la $psPD$ par construction directe de la zone de moyennage	133
D.1.3	Exemple d'évaluation efficace de la $psPD$ à l'aide d'un maillage équidistant sur la surface d'évaluation	134
D.2	Exemple d'évaluation de la $psPD$ sur une surface non plane	135
Annexe E (informative)	Format de fichier pour l'échange des données de champ	137
Annexe F (informative)	Justifications des méthodes appliquées dans l'IEC/IEEE 63195-1 et dans le présent document	139
F.1	Plage de fréquences	139
F.2	Calcul de la sPD	139
F.2.1	Application du vecteur de Poynting pour le calcul de la densité de puissance incidente	139
F.2.2	Zone de moyennage	140
Annexe G (informative)	Zone de moyennage carrée sur les surfaces d'évaluation non planes	141
G.1	Généralités	141
G.2	Exemple de mise en œuvre pour l'évaluation de la $psPD$ sur une surface non plane à l'aide d'une zone de moyennage de forme carrée	141
Annexe H (informative)	Validation des techniques d'évaluation de l'exposition maximale	142
H.1	Généralités	142
H.2	Validation de la recherche exhaustive	142
H.2.1	Validation de la recherche exhaustive	142
H.2.2	Validation à l'aide de la méthode de reconstruction	142
H.2.3	Validation de l'optimisation avec une puissance totale conduite fixe ou avec une puissance fixe à chaque accès	142
H.2.4	Validation de l'évaluation d'exposition maximale des résultats de mesure	143
H.3	Exemple de source de validation pour la validation de l'évaluation d'exposition maximale	143
H.3.1	Description	143
H.3.2	Positionnement	145
H.3.3	Liste de codage nominale, incertitude et puissance conduite P_R	146
H.3.4	Valeurs cibles	146
Annexe I (normative)	Fichiers supplémentaires et leurs sommes de contrôle	148
Bibliographie		149
Figure 1	– Vue d'ensemble de la procédure d'évaluation numérique de la densité de puissance	92
Figure 2	– Plans de référence de la puissance	97
Figure 3	– Exemple de configurations d'éléments rayonnants en différents sous-réseaux d'antenne sur le même DUT	102
Figure 4	– Logigramme de l'évaluation de la densité de puissance pour les DUT avec des réseaux ou sous-réseaux d'antennes décrits en 8.2.3	103

Figure 5 – Exemple de construction de la zone de moyennage dans une sphère de rayon fixe conformément au 8.4	106
Figure A.1 – Configuration de trois dipôles $\lambda/2$, D_1 , D_2 et D_3 , pour l'évaluation de l'interpolation et de la superposition des composantes du champ électrique et du champ magnétique	117
Figure A.2 – Guide d'ondes R320	120
Figure A.3 – Section du guide d'ondes R320 qui indique les emplacements des composantes E_y à enregistrer	121
Figure A.4 – Composante $S_i(x,y)$ calculée à l'aide de la Formule (A.4) pour les six jeux de paramètres du Tableau A.6 normalisés à leurs valeurs maximales	124
Figure A.5 – Sections des quarts symétriques des géométries d'essai (étoiles du DAS) pour l'étalonnage de l'algorithme de moyennage de la densité de puissance	126
Figure A.6 – Zones pour le calcul de la sPD sur un cône de l'étoile du DAS	126
Figure D.1 – Zone de moyennage pivotée sur la surface d'évaluation discrétisée (maillage de base)	135
Figure D.2 – Réduction de l'aire des triangles qui sont partiellement inclus dans la sphère de moyennage	136
Figure H.1 – Dimensions principales du gabarit du réseau à plaques	144
Figure H.2 – Dimensions principales du dispositif de validation, enveloppe en polypropylène incluse	145
Figure H.3 – Dispositif de validation avec la tête du SAM en position d'inclinaison	145
Figure H.4 – Dispositif de validation avec la tête du SAM en position de contact	146
Tableau 1 – Bilan des contributions à l'incertitude de l'algorithme de calcul pour le montage de validation ou le montage d'essai	109
Tableau 2 – Bilan d'incertitude du modèle développé du DUT	113
Tableau 3 – Bilan d'incertitude de calcul	114
Tableau A.1 – Interpolation et superposition des composantes de champ vectoriel; l'écart maximal admissible par rapport aux résultats de référence est de 10 %	117
Tableau A.2 – Calcul de la P_R ; l'écart maximal admissible par rapport aux résultats de référence est de 10 % pour la puissance rayonnée et pour l'amplitude du champ électrique du diagramme de champ lointain	118
Tableau A.3 – Pas de maillage fin et grossier minimal pour la méthode utilisée	121
Tableau A.4 – Résultats de l'évaluation des caractéristiques de dispersion calculée	121
Tableau A.5 – Résultats de l'évaluation de la représentation des éléments diélectriques anisotropes	122
Tableau A.6 – Paramètres pour la distribution de la densité de puissance incidente de la Formule (A.4)	123
Tableau B.1 – Comparaison des méthodes expérimentales d'évaluation de la puissance rayonnée	128
Tableau H.1 – Dimensions principales du gabarit du réseau à plaques	143
Tableau H.2 – Dimensions principales du dispositif de validation	143
Tableau H.3 – Valeurs cibles pour le dispositif de validation avec la liste de codage nominale	147
Tableau H.4 – Valeurs cibles pour le dispositif de validation avec la liste de codage infinie	147

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 2: Procédure de calcul

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 63195-2 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 supplémentaires exigés pour la vérification du code conformément à l'Annexe A. Les liens de téléchargement et les sommes de contrôle de ces fichiers peuvent être consultés à l'Annexe I.

Le texte de la présente Norme internationale est issu des documents de l'IEC suivants:

Projet	Rapport de vote
106/564/FDIS	106/569/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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC/IEEE 63195-2:2022

INTRODUCTION

Le présent document fournit une méthode d'évaluation de l'exposition humaine aux dispositifs sans fil à l'aide de méthodes de calcul. Le présent document a été élaboré en vue de fournir des procédures pour la modélisation et l'évaluation numériques de ces dispositifs sans fil fonctionnant à proximité de la tête, tenus à la main ou devant le visage, installés sur le corps ou intégrés dans des vêtements. Il s'applique aux émetteurs individuels, ainsi qu'aux émetteurs qui fonctionnent simultanément avec d'autres émetteurs dans un même produit. Le choix entre la méthode des différences finies dans le domaine temporel (c'est-à-dire FDTD, *Finite-Difference Time-Domain*) et la méthode des éléments finis (c'est-à-dire FEM, *Finite Element Methods*) est facultatif, mais peut être influencé par l'application. Les procédures de calcul ont l'avantage de fournir des méthodes répétables non intrusives pour déterminer l'exposition dans un objet ou à proximité d'un objet, sans nécessiter l'emploi d'équipements matériels coûteux. Les catégories de dispositifs couvertes 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. Le présent document spécifie:

- les exigences relatives au logiciel numérique (Article 0);
- le développement et la validation du modèle (Article 7);
- le calcul et le moyennage de la densité de puissance (Article 8);
- l'évaluation de l'incertitude (Article 9);
- les exigences relatives au rapport (Article 10).

En vue d'établir le présent document, le comité d'études 106 de l'IEC (CE 106) 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 11 (JWG 11) concernant les méthodes de calcul pour l'évaluation de la densité de puissance de l'exposition humaine aux champs radioélectriques en provenance de dispositifs sans fil à proximité immédiate de la tête et du corps.

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 2: Procédure de calcul

1 Domaine d'application

Le présent document spécifie les procédures de calcul pour des calculs conservateurs et reproductibles de la densité de puissance (PD, *Power Density*) incidente sur la tête ou le corps humain, provenant de dispositifs de transmission par champ électromagnétique (EMF, *Electromagnetic Field*) radiofréquence (RF). Les procédures de calcul décrites appliquent la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD, *Finite-Difference Time-Domain*) ou la méthode des éléments finis (FEM, *Finite Element Methods*), qui sont des techniques de calcul pouvant être utilisées pour déterminer les grandeurs électromagnétiques en résolvant les équations de Maxwell dans une incertitude de calcul spécifiée. Les procédures spécifiées dans le présent document s'appliquent à l'évaluation de l'exposition d'une vaste majorité de la population lors de l'utilisation de dispositifs 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, et qui peuvent être utilisés alors que leurs parties rayonnantes se trouvent à des distances inférieures ou égales à 200 mm de la tête ou du corps humain.

Le présent document peut être utilisé 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 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.

Les procédures du présent document ne s'appliquent pas à l'évaluation de la densité de puissance des champs électromagnétiques émis ou altérés par des dispositifs ou des objets destinés à être implantés dans le corps.

NOTE – Pour l'évaluation de l'exposition combinée en provenance de plusieurs émetteurs simultanés qui fonctionnent à des fréquences inférieures à 6 GHz, les normes applicables pour les calculs du DAS sont l'IEC/IEEE 62704-1:2017 et l'IEC/IEEE 62704-4:2020.

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 62704-1:2017, *Determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human body from wireless communications devices, 30 MHz to 6 GHz – Part 1: General requirements for using the finite difference time-domain (FDTD) method for SAR calculations* (disponible en anglais seulement)

IEC/IEEE 62704-4:2020, *Détermination du débit d'absorption spécifique (DAS) maximal moyenné dans le corps humain, produit par les dispositifs de communications sans fil, 30 MHz à 6 GHz – Partie 4: Exigences générales d'utilisation de la méthode des éléments finis pour les calculs du DAS*

IEC/IEEE 63195-1:2021¹, *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 1: Procédure de mesure*

IEEE Std 145, *IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas* (disponible en anglais seulement)

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 intégré 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 8.5. Voir également les justifications données à l'Annexe F concernant les spécifications de PD fournies en 8.5.

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".

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 déterminée 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".

¹ A paraître.

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 (3.2.2)

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.

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 maximisée moyennée dans l'espace

mpsPD

psPD (3.1.3) du vecteur d'excitation (3.3.5) qui maximise sa valeur

Note 1 à l'article: L'abréviation "mpsPD" est dérivée du terme anglais développé correspondant "maximized peak spatial-average power density".

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

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.

3.2.2

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 (3.1.6) 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.

3.2.3

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 3.2.5 et 3.2.4, respectivement.

3.2.4

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.

3.2.5

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.]

3.2.6

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

[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 électriques et magnétiques.]

3.3 Paramètres techniques de fonctionnement et d'antenne du dispositif d'essai

3.3.1

canal

canal RF

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 calculs de la densité de puissance sont réalisés au niveau de canaux spécifiques; par exemple, canaux supérieur, médian et inférieur de la bande de transmission.

3.3.2

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.

3.3.3

réseau

<d'antennes> 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

3.3.4

liste de codage

ensemble de tous les vecteurs d'excitation possibles

3.3.5

vecteur d'excitation

vecteur de tous les phaseurs qui représentent le signal d'entrée vers un réseau ou sous-réseau d'antennes

Note 1 à l'article: Les entrées d'une liste de codage sont des vecteurs d'excitation.

3.3.6

module

sous-ensemble

émetteur-récepteur RF autonome qui ne nécessite que l'hébergement de puissance et de communication au moyen d'un connecteur, de grilles matricielles à billes ou de broches, et qui est conçu pour être incorporé dans un produit fini

3.4 Paramètres de calcul

3.4.1

domaine de calcul

ensemble de tous les emplacements de l'espace où le champ électrique ou magnétique est calculé à l'aide d'une équation mathématique ou d'un algorithme de calcul

3.4.2

source localisée

source dont l'impédance interne est appliquée à une composante du champ électrique sur une arête du maillage de calcul

3.4.3

conducteur électrique parfait

CEP

matériau dont la conductivité électrique infinie ne dissipe aucune énergie

3.4.4

principe de l'équivalence des surfaces

théorème selon lequel les sources d'une région fermée peuvent être remplacées par des sources de substitution sur la surface de la région, ce qui aboutit à la génération du même champ en dehors des régions fermées

Note 1 à l'article: Plus d'informations peuvent être obtenues dans [1].

3.5 Paramètres d'incertitude

3.5.1

incertitude

intervalle de confiance de la valeur évaluée

3.5.2

incertitude type

écart-type estimé du résultat d'une mesure ou d'un calcul, égal à la racine carrée positive de la variance estimée

3.5.3

incertitude composée

écart-type estimé du résultat d'une mesure ou d'un calcul 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

3.5.4

incertitude élargie

grandeur qui définit un intervalle concernant le résultat d'une mesure ou d'un calcul, prévu pour englober une distribution de valeurs dans un intervalle de confiance spécifié qui peut être raisonnablement être attribué au mesurande

3.5.5

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
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, de la normale à la surface, dirigée vers le fantôme	watt par mètre carré	W/m ²
sPD_{tot+}	densité de puissance totale moyennée dans l'espace, dirigée vers le fantôme	watt par mètre carré	W/m ²
sPD_{mod+}	densité de puissance moyennée dans l'espace, module	watt par mètre carré	W/m ²
$psPD$	densité de puissance maximale moyennée dans l'espace	watt par mètre carré	W/m ²
$mpsPD$	densité de puissance maximale maximisée moyennée dans l'espace	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	$4\pi \times 10^{-7}$ H/m

4.2 Termes abrégés

ABC (Absorbing Boundary Condition)	Condition aux limites absorbantes
CAO	Conception assistée par ordinateur
TFD	Transformation de Fourier discrète
DUT (Device Under Test)	Dispositif en essai
PIRE	Puissance isotrope rayonnée équivalente
FDTD (Finite-Difference Time-Domain)	Différences finies dans le domaine temporel
FEM (Finite Element Method)	Méthode des éléments finis
HDF5 (Hierarchical Data Format)	Format de données hiérarchiques version 5
ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)	Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants
FI	Fréquence intermédiaire
MEE (Maximum Exposure Evaluation (technique))	Evaluation de l'exposition maximale (technique)
P_A	Puissance disponible à partir du générateur
P_M	Puissance vers la ligne de transmission adaptée
P_O	Puissance reçue par l'antenne
P_R	Puissance rayonnée par l'antenne
PD (Power Density)	Densité de puissance
CEP	Conducteur électrique parfait
RF	Radiofréquence, fréquence radioélectrique
SAM (Specific Anthropomorphic Mannequin)	Mannequin anthropomorphique spécifique
DAS	Débit d'absorption spécifique
SI	Système international
SL	Stéréolithographie

5 Vue d'ensemble et application du présent document

5.1 Vue d'ensemble de l'évaluation numérique

Le présent document spécifie les procédures pour l'évaluation de la densité de puissance électromagnétique moyennée dans l'espace des dispositifs de communication sans fil qui fonctionnent à des fréquences de 6 GHz à 300 GHz, à l'aide de méthodes de calcul qui appliquent la technique des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) ou la méthode des éléments finis (FEM). L'évaluation de la densité de puissance s'effectue selon différentes étapes, comme suit:

- détermination de l'évaluation exigée;
- choix de la méthodologie et d'un progiciel de calcul vérifié applicable;
- définition des essais à réaliser;
- développement et validation du modèle numérique du DUT;
- évaluation de la densité de puissance;

f) quantification de l'incertitude.

La Figure 1 fournit une vue d'ensemble de ces étapes et indique les paragraphes qui les décrivent précisément.

Les Articles 6 à 10 décrivent les procédures exigées pour l'évaluation de la densité de puissance numérique d'un DUT. L'évaluation doit être effectuée à l'aide d'un logiciel vérifié concernant la mise en œuvre technique correcte du présent document. Les procédures complémentaires qui décrivent la vérification du logiciel de calcul numérique et qui concernent principalement les fabricants du logiciel sont présentées dans les annexes. A défaut, le logiciel peut être vérifié par l'utilisateur du présent document, par exemple dans le cadre de l'évaluation de la densité de puissance d'un DUT, selon ces méthodes.

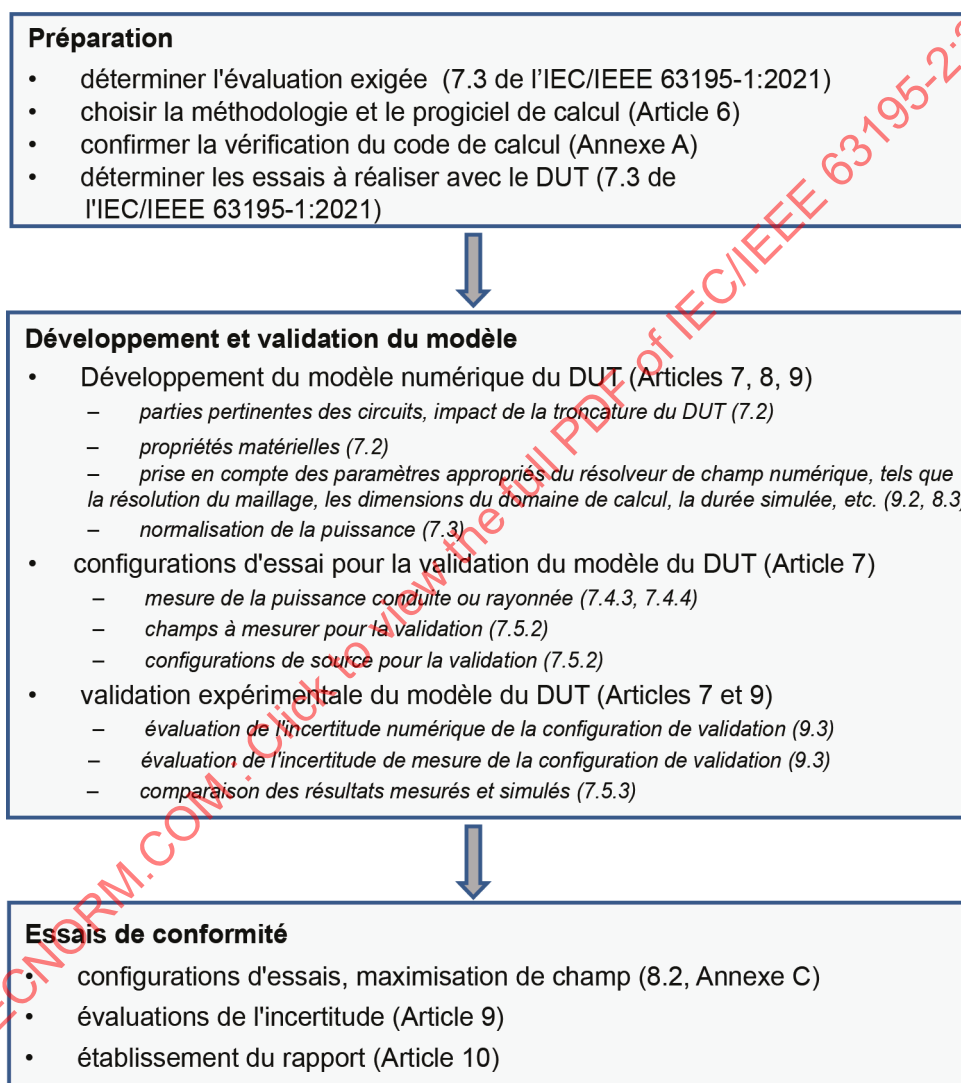


Figure 1 – Vue d'ensemble de la procédure d'évaluation numérique de la densité de puissance

5.2 Application du présent document

Le présent document et l'IEC/IEEE 63195-1 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 à une fréquence comprise

entre 6 GHz et 300 GHz. Le présent document spécifie les procédures de calcul, tandis que l'IEC/IEEE 63195-1 spécifie les procédures de mesure.

L'IEC/IEEE 63195-1 et le présent document ont été développés dans une période relativement courte de deux ans, à la suite de la documentation dans l'IEC TR 63170:2018 [2]² 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 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 incidente et absorbée/épithéliale ou la densité de puissance incidente, respectivement, moyennée sur une zone carrée de 1 cm² ou 4 cm².

L'IEC/IEEE 63195-1 contient toutes les spécifications pertinentes pour l'application des procédures de mesure aux fins d'évaluation de la conformité. Même si elle peut être appliquée indépendamment du présent document, elle 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 63195-1 et au présent document, mais qui ne sont spécifiées que dans le présent document. De même, l'évaluation de la conformité des calculs est décrite dans le présent document. Les méthodes de l'IEC/IEEE 63195-1 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 de l'IEC/IEEE 63195-1 et du présent document, 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 [2] et de prendre en compte les conditions d'exposition autres que l'incidence perpendiculaire dans le champ lointain. L'Annexe F décrit les options et leurs justifications.

Ces options n'empêchent pas l'applicabilité des méthodes spécifiées dans l'IEC/IEEE 63195-1 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 logiciel numérique

Le présent Article 6 décrit les caractéristiques et fonctionnalités du logiciel numérique à utiliser pour le calcul de la densité de puissance maximale moyennée dans l'espace (*psPD*) qui sont exigées à la fois pour l'utilisation du logiciel conformément à l'Article 7, l'Article 8 et l'Article 9 et pour la vérification de sa mise en œuvre correcte selon l'Annexe A. Les caractéristiques et fonctionnalités suivantes du logiciel numérique sont exigées:

- a) résolveur d'équations de Maxwell fondé sur la FDTD ou la FEM dans le domaine fréquentiel conformément aux définitions de l'IEC/IEEE 62704-1:2017 et de l'IEC/IEEE 62704-4:2020, respectivement;
- b) environnement de modélisation et générateur de maillage pour la représentation des parties électriquement pertinentes du DUT et des objets environnants afin de rendre les champs électriques et magnétiques avec une résolution géométrique spécifiable limitée uniquement par la mémoire informatique disponible;
- c) représentation de conducteurs électriques parfaits isotropes;

² Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

- d) représentation de matériaux diélectriques isotropes de permittivités relatives $\varepsilon_r \geq 1$ et de conductivités électriques $\sigma \geq 0$;
- e) représentation de matériaux diélectriques anisotropes uniaxiaux de permittivités relatives $\varepsilon_r \geq 1$ et de conductivités électriques $\sigma \geq 0$;
- f) pertes électriques isotropes $\sigma < \infty$ des conducteurs métalliques représentés par de fines feuilles ou des filaments;
- g) interpolation des résultats du calcul dans le domaine fréquentiel vers des points spécifiés du domaine de calcul;
- h) superposition des champs vectoriels E et H calculés dans le domaine fréquentiel d'un nombre spécifiable de résultats de calcul à l'aide de facteurs d'échelle complexes spécifiés, par exemple pour l'évaluation de l'orientation du faisceau d'antennes réseaux à commande de phase;
- i) calcul de la puissance dissipée en tenant compte des pertes des éléments diélectriques et des conducteurs métalliques pour un nombre spécifiable de résultats de calcul superposés sur des maillages spécifiés;
- j) superposition des diagrammes de champs lointains d'un nombre spécifiable de résultats de calcul à l'aide de facteurs d'échelle complexes spécifiés, y compris l'évaluation de P_R , par exemple pour l'évaluation de l'orientation du faisceau d'antennes réseaux à commande de phase;
- k) calcul de la sPD et de la $psPD$ conformément au 8.5;
- l) calcul de la $mpSPD$ conformément à l'Annexe C.

Les extensions de la FDTD ou de la FEM qui incluent les caractéristiques et fonctionnalités exigées a) à l), mais qui fournissent des fonctionnalités supplémentaires, peuvent être appliquées à condition qu'elles aient été entièrement validées et que leur mise en œuvre ait été vérifiée. Ces méthodes alternatives doivent assurer au moins la même exactitude que les méthodes FDTD ou FEM spécifiées dans l'IEC/IEEE 62704-1:2017 et l'IEC/IEEE 62704-4:2020. La technique d'intégration finie (FIT) dans le domaine temporel peut être considérée comme une extension des FDTD dans ce contexte.

NOTE 1 L'IEC/IEEE 62704-1:2017 et l'IEC/IEEE 62704-4:2020 spécifient les procédures permettant de déterminer le débit maximal d'absorption spécifique dans l'espace dans le corps humain à l'aide de méthodes de calcul.

NOTE 2 L'IEC/IEEE 62704-1:2017 et l'IEC/IEEE 62704-4:2020 couvrent l'application de la FDTD et de la FEM dans la plage de fréquences de 30 MHz à 6 GHz. En plus de la vérification des codes décrite dans ces deux normes, de nombreux ouvrages scientifiques valident les deux méthodes numériques pour l'évaluation de l'exposition dans cette plage de fréquences. Pour la plage de fréquences étendue jusqu'à 300 GHz qui est couverte par le présent document, peu d'ouvrages démontrent la validité des deux méthodes. Des exemples d'application de cette plage de fréquences sont disponibles dans [3]. En règle générale, la FDTD et la FEM peuvent être considérées comme intrinsèquement indépendantes de la fréquence. Si la discrétisation du domaine de calcul et la géométrie à calculer tiennent dûment compte des critères de discrétisation conventionnels, il peut être attendu que les méthodes assurent la même exactitude que dans les plages de fréquences pour lesquelles une validation expérimentale a été effectuée. La discrétisation adéquate du domaine de calcul et la géométrie sont validées par l'évaluation de l'incertitude (Article 9).

Le logiciel numérique peut calculer les champs électriques et magnétiques en dehors du domaine de calcul à l'aide du principe d'équivalence des surfaces si toutes les sources et parties du DUT sont contenues dans le domaine de calcul (8.3). Si le logiciel applique le calcul de champ en utilisant le principe d'équivalence des surfaces, il doit être validé conformément à l'Article A.7.

7 Développement et validation du modèle

7.1 Généralités

Dans le cadre de l'évaluation expérimentale de la densité de puissance, le DUT non modifié est évalué selon un protocole normalisé à l'aide d'un équipement de mesure dont les contributions à l'incertitude sont connues. Les calculs numériques d'un dispositif sans fil sont plus souples que les essais à réaliser ou que la modélisation de conditions de fonctionnement réelles; ils peuvent même être nécessaires lorsque l'évaluation expérimentale est trop fastidieuse, voire techniquement impossible. L'une des exigences essentielles relatives à l'application de méthodes numériques pour l'évaluation de la densité de puissance en ce qui concerne les limites d'exposition est la validation du modèle numérique du DUT à l'aide de méthodes expérimentales. La validation expérimentale peut être effectuée dans une configuration techniquement plus simple que les évaluations complètes du DUT selon l'IEC/IEEE 63195-1:2021. Par conséquent, un modèle de DUT validé de façon appropriée peut être évalué numériquement dans de nombreux essais à réaliser, réduisant ainsi l'effort global pour démontrer la conformité. Les exigences et recommandations relatives à la modélisation et à la validation du DUT, à l'équipement d'essai et aux essais à réaliser sont spécifiées en 7.2, 7.3, 7.4 et 7.5. L'évaluation de l'incertitude des résultats obtenus avec les méthodes appliquées est décrite à l'Article 9.

7.2 Développement du modèle numérique du DUT

Le développement d'un modèle numérique de DUT pour l'évaluation de la densité de puissance exige la prise de nombreuses décisions concernant le niveau de détail à représenter dans le domaine de calcul. En raison du grand nombre de dispositifs modernes et du niveau élevé des innovations techniques dans le domaine, des lignes directrices générales relatives au développement du modèle ne peuvent être données. Les étapes du développement du modèle de DUT sont décrites ci-après.

- a) Il convient de fonder le modèle du DUT sur ses données CAO d'origine afin d'éviter les erreurs ou imprécisions lors de la modélisation des éléments diélectriques ou des conducteurs.

NOTE 1 Le développement d'un modèle numérique du DUT à partir de ses données CAO peut exiger des simplifications ou des extensions individuelles des données disponibles, de sorte que les exigences spécifiques relatives aux données CAO et à la procédure d'importation des données ne puissent pas être formulées ici. La vérification du modèle numérique conformément au 7.5 est considérée comme une preuve suffisante que le modèle est conforme au DUT d'origine pour les besoins du présent document.

- b) Toutes les parties conductrices doivent être intégrées au modèle CAO, car même les conducteurs éloignés de l'antenne peuvent se coupler parasitairement et agir comme des radiateurs. Des considérations particulières s'appliquent si la troncature du dispositif est utilisée (voir étape g) et 9.2.5).
- c) Il convient de modéliser les propriétés diélectriques de toutes les parties importantes de l'environnement des radiateurs et des lignes de transmission RF de manière adéquate compte tenu de l'influence de la fréquence. Il convient de documenter les références relatives aux propriétés diélectriques, lorsqu'elles sont disponibles.
- d) Il convient d'inclure les éléments diélectriques anisotropes dans le modèle du DUT s'ils sont pertinents pour ses caractéristiques RF.
- e) Il convient d'inclure les pertes métalliques dans le modèle du DUT si elles sont pertinentes pour ses caractéristiques RF ou pour la normalisation de la puissance.
- f) La modélisation des réseaux d'alimentation ou d'adaptation est exigée si les champs de ces réseaux ne sont pas confinés dans un environnement fermé. Sinon, des sources localisées peuvent être placées directement au point d'alimentation de l'antenne. Les calculs de dispositifs portatifs à antennes multibandes intégrées ont montré qu'il est souvent difficile d'obtenir une bonne correspondance entre l'impédance calculée au point d'alimentation et les données de mesure. Néanmoins, la normalisation des résultats d'évaluation de l'exposition à P_R donne une exactitude satisfaisante [4].

- g) Il convient que le système informatique dispose de ressources de calcul suffisantes (mémoire de travail, processeurs, stockage) pour calculer l'ensemble du modèle de DUT et la surface d'évaluation. Dans certains cas, un modèle de DUT peut être tronqué. Il convient toutefois de ne pas tronquer les champs réactifs du modèle. Cela doit être démontré par comparaison des coefficients de réflexion d'entrée de l'antenne ou des éléments du réseau d'antennes, ou par identification du volume de stockage de l'énergie réactive du DUT. Ces derniers peuvent être identifiés par comparaison du rapport entre les amplitudes locales du champ électrique et du champ magnétique et l'impédance d'onde de l'espace libre. L'impact relatif à la troncature du modèle doit être indiqué dans le bilan d'incertitude.
- h) Des recommandations concernant les dimensions du domaine de calcul peuvent être consultées en 8.3. La surface d'évaluation peut ne pas être incluse dans le domaine de calcul, car les champs sur celle-ci peuvent être calculés au moyen du principe de l'équivalence des surfaces (8.3).
- i) Le rapport d'essai (Article 10) doit synthétiser la manière dont ces recommandations sont prises en compte pour le développement du modèle du DUT.

NOTE 2 Des recommandations supplémentaires concernant le développement du modèle du DUT peuvent être consultées en 5.4 de l'IEC/IEEE 62704-3:2017 [5]. Même si l'IEC/IEEE 62704-3:2017 fait référence au calcul de dispositifs portatifs qui fonctionnent à des fréquences jusqu'à 6 GHz à l'aide de la méthode FDTD, le 5.4 de l'IEC/IEEE 62704-3:2017 peut être considéré comme généralement suffisant pour fournir des recommandations en dehors de son domaine d'application initial, c'est-à-dire pour des dispositifs qui fonctionnent dans la plage de fréquences prise en compte dans le présent document et pour l'importation de modèles CAO dans des logiciels de calcul à l'aide de la FEM.

7.3 Normalisation de la puissance

La Figure 2 représente les différents plans de référence de la puissance dans un DUT et son modèle de calcul. La puissance disponible à la source P_A est injectée dans l'antenne par le biais d'une ligne de transmission et/ou d'un circuit d'adaptation qui entraîne des pertes (P_M) dues à une désadaptation de l'impédance et à une dissipation de la puissance disponible dans les circuits, pour donner la puissance de sortie P_O acceptée par l'antenne. Des pertes supplémentaires peuvent se produire dans l'antenne elle-même, aussi la puissance émise par le DUT est appelée puissance rayonnée P_R . Toutes les grandeurs relatives à la puissance sont définies dans l'IEEE Std 145.

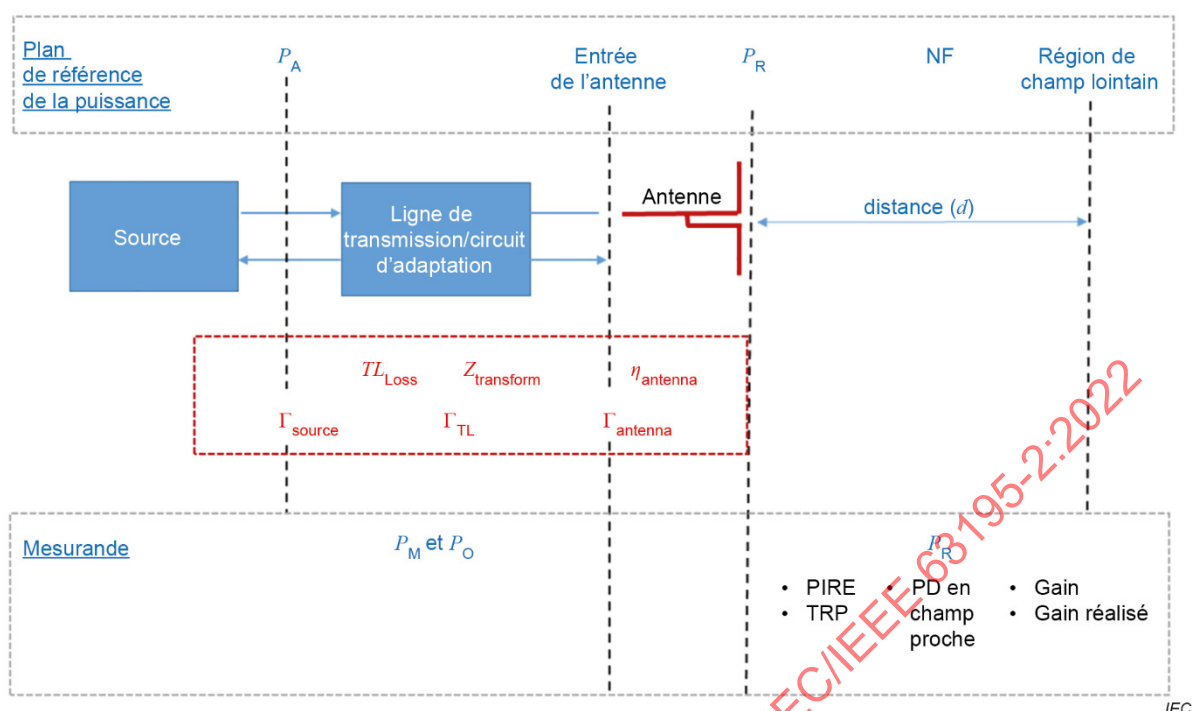
Habituellement, le modèle de calcul d'un DUT comporte un réseau d'alimentation ou d'adaptation simplifié, qui peut entraîner

- a) des écarts spécifiques d'impédance au point d'alimentation de l'antenne;
- b) une représentation inexacte du couplage croisé; ou
- c) des différences de pertes de transmission diélectriques ou conduites.

Même si ces grandeurs sont toujours disponibles dans le modèle de calcul, il n'est pas nécessaire qu'elles constituent une représentation exacte de celles du DUT réel. En outre, les accès d'alimentation ou d'antenne du DUT peuvent ne pas être accessibles pour les mesures de la puissance conduite. En général, seule la PIRE ou la P_R du DUT peut être évaluée de façon expérimentale pour quantifier P_R (Annexe B).

NOTE De nombreux documents font référence à P_R comme la puissance totale rayonnée ou TRP (Total Radiated Power).

Toutes les grandeurs (vecteur de Poynting, PD , sPD , $psPD$ et $mpsPD$) doivent être normalisées à la puissance rayonnée P_R , tant pour l'évaluation de la densité de puissance de calcul conformément au 8.2 que pour la validation du modèle de calcul du DUT décrit en 7.2. Si les accès d'alimentation ou d'antenne du DUT sont accessibles pour les mesures de la puissance conduite, la puissance rayonnée P_R peut être calculée à partir de P_A ou P_M , à condition que toutes les pertes du DUT soient caractérisées avec l'incertitude spécifiée.



Légende

P_A	puissance disponible à la source
P_M	puissance vers la ligne de transmission adaptée
P_O	puissance de sortie reçue par l'antenne
P_R	puissance rayonnée
Γ_{source}	coefficient de réflexion de la source
Γ_{TL}	coefficient de réflexion de la ligne de transmission ou du circuit d'adaptation
$\Gamma_{antenna}$	coefficient de réflexion de l'antenne
$\eta_{antenna}$	rendement de l'antenne
TL_{loss}	puissance dissipée dans les lignes de transmission
$Z_{transform}$	matrice de transformation de la ligne de transmission ou du circuit d'adaptation
FF	champ lointain
NF	champ proche

NOTE Les termes et symboles sont définis à l'Article 3 et dans l'IEEE Std 145.

Figure 2 – Plans de référence de la puissance

7.4 Exigences relatives à l'équipement d'essai expérimental pour la validation du modèle

7.4.1 Généralités

Le présent document ne spécifie que les exigences génériques relatives à l'équipement de mesure pour la validation du modèle en vue de permettre l'utilisation de différents instruments d'essai. L'instrumentation d'essai doit satisfaire aux exigences de l'Article 6 de l'IEC/IEEE 63195-1:2021 applicables à la validation du modèle de calcul de DUT. L'Article 6 de l'IEC/IEEE 63195-1:2021 spécifie les exigences suivantes:

- bruit ambiant et température ambiante en laboratoire, et réflexions des parois du laboratoire;
- plage dynamique, couplage croisé, taille physique et étalonnage des sondes de champ;

- étalonnage de l'instrumentation de mesure qui reçoit les signaux de la sonde et les prépare pour être traités par un système informatique;
- résolution spatiale, exactitude et répétabilité pour le balayage des systèmes à sonde unique;
- exigences supplémentaires relatives à la résolution spatiale en ce qui concerne les systèmes à sonde multiple, comme la distance de séparation minimale;
- exigences relatives au rapport de l'algorithme qui détermine la grille de mesure;
- propriétés du matériau et réflexions du support de dispositif;
- post-traitement selon les spécifications du 8.5 définies dans le présent document.

Pour l'évaluation expérimentale d'un DUT aux fins de la validation du modèle, l'équipement utilisé doit permettre:

- a) l'évaluation directe du vecteur de Poynting dans le champ proche du DUT sans appliquer de moyennage spatial;
- b) la corrélation du vecteur de Poynting avec la P_R du DUT fondée sur la P_A , la P_M ou la P_R mesurée;
- c) l'évaluation du bilan d'incertitude de l'ensemble de la chaîne d'évaluation expérimentale.

7.4.2 Conditions ambiantes et support de dispositif

Les exigences relatives aux conditions radiofréquences ambiantes du site d'essai et du support de dispositif doivent satisfaire au 6.2 et au 6.6 de l'IEC/IEEE 63195-1:2021, respectivement, qui spécifient les exigences relatives au bruit ambiant, aux réflexions des parois du laboratoire, aux contraintes de température ambiante et aux propriétés du matériau, ainsi qu'aux réflexions admissibles du support de dispositif.

7.4.3 Mesure de la puissance

7.4.3.1 Mesure de la puissance conduite

Si les moyens nécessaires sont disponibles, la puissance rayonnée peut être évaluée en fonction de la puissance conduite, à partir de mesures de la puissance à la sortie de la source (amplificateur) (P_A) ou à la sortie de la ligne de transmission (P_M) ou du circuit d'adaptation connecté à l'antenne (P_O) (pour plus d'informations, voir Figure 2). Pour le calcul de la puissance rayonnée, la quantification des pertes diélectriques ou conductrices dans le circuit d'adaptation, l'antenne, etc., ne peut être déterminée lors de ces mesurages; elles doivent être mises entre parenthèses, par exemple à partir des hypothèses les plus défavorables ou de données tierces. Dans ce cas, les justifications et références appropriées doivent être fournies.

L'équipement de mesure utilisé doit présenter les caractéristiques suivantes:

- a) évaluation de la P_O , de la P_M et des coefficients de réflexion pour les connecteurs et les impédances de ligne de transmission du DUT;
- b) étalonnage traçable de la mesure de la P_O , de la P_M et du coefficient de réflexion pour la fréquence et la modulation du signal mesuré du DUT (Article B.2);
- c) bilan d'incertitude.

7.4.3.2 Mesure de la puissance rayonnée

Les mesures de la puissance rayonnée peuvent être fondées sur des mesures de la P_R ou de la PIRE et doivent présenter les caractéristiques suivantes [6]:

- a) évaluation de la P_R ou de la PIRE dans l'espace libre;
- b) étalonnage traçable de la mesure de la P_R pour la fréquence et la modulation du signal mesuré du DUT;

- c) étalonnage traçable de la mesure de la PIRE pour la fréquence et la modulation du signal mesuré du DUT;
- d) évaluation traçable du gain d'antenne pour le calcul de la P_R à partir de la PIRE (Article B.3);

NOTE Les informations relatives au gain d'antenne peuvent être obtenues par des calculs.

- e) bilan d'incertitude.

Lorsque la P_R est mesurée, celle-ci est obtenue directement avec la distribution tridimensionnelle de la PIRE. Lorsque seule la PIRE est mesurée, par exemple dans la direction de pointe du faisceau d'émission, la P_R ne peut être calculée que si le gain d'antenne et son incertitude sont connus.

7.5 Configurations d'essai pour la validation du modèle du DUT

7.5.1 Généralités

Les essais exigés et la comparaison des résultats de calcul et expérimentaux pour la validation du modèle du DUT sont décrits en 7.5.2 et 7.5.3. Lors des essais, le champ électrique ou le champ magnétique dans le champ proche du DUT est évalué sur une surface en choisissant les configurations spécifiées en 8.2. La PD doit être calculée à partir du vecteur de Poynting ou des champs électriques ou magnétiques conformément à la spécification du système de mesure utilisé pour la validation du modèle. Tous les résultats doivent être normalisés à la P_R . Pour comparer les résultats mesurés et calculés, les exigences relatives à l'équipement d'essai expérimental doivent être prises en compte (7.4), le modèle du DUT doit être validé (7.5.3) et l'incertitude de calcul et l'incertitude de mesure doivent être évaluées, comme cela est décrit en 9.3.

7.5.2 Essais à réaliser

7.5.2.1 Bandes de fréquences et configurations d'antenne

L'évaluation expérimentale et par calcul du champ proche du DUT doit être effectuée à la fréquence médiane de chaque bande dans laquelle le DUT peut fonctionner. Pour chaque antenne, réseau ou sous-réseau d'antennes qui peut fonctionner ou être commandé individuellement, un calcul de validation et un mesurage doivent être réalisés dans chaque bande de fréquences applicable.

7.5.2.2 Evaluation dans le champ proche

La PD du DUT doit être mesurée et calculée sur une grille rectiligne sur une surface de mesure de validation rectangulaire, selon les étapes suivantes:

- a) la distance entre la surface de mesure de validation et le DUT doit être inférieure ou égale à la distance minimale entre le DUT et la surface d'évaluation décrite en 8.3. Si des mesures à cette distance ne sont pas possibles, les champs électriques ou magnétiques doivent être mesurés à la distance minimale possible compte tenu des limites du système de mesure utilisé et des caractéristiques particulières du DUT. Une justification de la distance choisie doit être fournie;
- b) la section de la surface de mesure de validation doit entièrement inclure la section du domaine de calcul;
- c) le vecteur de Poynting doit être évalué aux emplacements des points mesurés, c'est-à-dire sur la grille de mesure. Si nécessaire, des méthodes d'interpolation peuvent être utilisées pour déterminer les résultats de calcul aux emplacements exigés, à condition que les contributions de ces méthodes d'interpolation à l'incertitude des résultats soient prises en compte dans l'incertitude de calcul U_{sim} ;
- d) la PD mesurée et calculée doit être normalisée à la P_R en tenant compte des pertes diélectriques et des pertes par conduction de l'antenne (7.4.3);

- e) l'incertitude des évaluations expérimentales et par calcul du champ proche doit être évaluée conformément à l'Article 9.

7.5.3 Détermination de la validité du modèle du DUT

La validation du modèle de calcul du DUT doit être effectuée selon les étapes suivantes:

- normaliser la sPD expérimentale à la P_R mesurée, désignée comme $v_{ref,n}$;
- déterminer l'incertitude de mesure U_{ref} de l'évaluation dans le champ proche conformément au Tableau 3 de l'Article 8 de l'IEC/IEEE 63195-1:2021. Le Tableau 3 de l'Article 8 de l'IEC/IEEE 63195-1:2021 récapitule les composantes d'incertitude du système de mesure, du DUT et des facteurs environnementaux. L'incertitude de la normalisation de puissance selon le plan de référence de puissance choisi (voir 7.3, Annexe B) doit être considérée comme une entrée supplémentaire dans l'évaluation de U_{ref} conformément au Tableau 3 de l'Article 8 de l'IEC/IEEE 63195-1:2021. L'incertitude type composée doit être évaluée pour un intervalle de confiance de 95 % ($k = 2$);
- normaliser la sPD de calcul à la P_R calculée, désignée comme $v_{sim,n}$;
- déterminer l'incertitude de calcul U_{sim} de l'évaluation de la PD conformément au 9.2;
- en chaque point n où $v_{ref,n}$ ou $v_{sim,n}$ est supérieure à 5 % de la valeur maximale mesurée ou calculée $\max(v_{ref,n}, v_{sim,n})$, valider si l'écart entre la valeur mesurée au point n , $v_{ref,n}$ et la valeur calculée $v_{sim,n}$ se situe dans l'incertitude composée de U_{ref} et U_{sim} en évaluant la Formule (3):

$$E_n = \sqrt{\frac{(v_{sim,n} - v_{ref,n})^2}{(v_{sim,n} \times U_{sim,k=2})^2 + (v_{ref,n} \times U_{ref,k=2})^2}} \leq 1 \quad (3)$$

L'indice ref de la Formule (3) se rapporte aux résultats expérimentaux de référence.

Si l'écart se situe dans les limites de l'incertitude composée, c'est-à-dire si $E_n \leq 1$ en tout point considéré, le modèle du DUT doit être considéré comme valide. Si l'écart ne se situe pas dans l'incertitude prévue, le modèle du DUT n'est pas valide et doit être revu.

7.5.4 Réduction des essais pour les DUT supplémentaires

Des DUT similaires peuvent faire l'objet d'une validation de modèle réduite, où la série complète des essais définis en 7.5.2 n'est exigée que sur un sous-ensemble de DUT. Des réglementations nationales applicables peuvent exister. Certains modules peuvent être soumis à des essais indépendants. Les résultats d'une telle validation peuvent être applicables à d'autres DUT d'un type similaire. Des modèles de DUT similaires sont par exemple constitués de dispositifs qui partagent:

- les mêmes circuits RF (émetteur, point d'alimentation d'antenne, composants d'adaptation, etc.);
- des matériaux diélectriques similaires dont les propriétés diélectriques sont équivalentes;
- la même antenne et la même mise à la terre de l'antenne.

Si des modèles de DUT similaires sont validés par un nombre réduit d'essais ou par des résultats de validation partagés, une justification doit être donnée, expliquant pourquoi les essais s'appliquent aux modules respectifs. Elle doit être documentée séparément. Tout impact sur l'incertitude doit être quantifié par des essais supplémentaires et documenté dans l'évaluation de l'incertitude (Article 9).

8 Calcul et moyennage de la densité de puissance

8.1 Surface d'évaluation

Pour les fréquences supérieures à 6 GHz, les lignes directrices concernant l'exposition humaine aux champs électromagnétiques spécifient les limites de la densité de puissance évaluée comme une moyenne dans l'espace sur la zone de moyennage d'aire A_{av} [7], [8]. Cette surface est appelée "zone de moyennage" ci-après. Cette zone de moyennage fait partie de la surface d'évaluation. Conformément au 7.2.4 de l'IEC/IEEE 63195-1:2021, les différentes surfaces d'évaluation suivantes sont spécifiées:

- a) surface interne plane du fantôme elliptique décrit dans l'IEC 62209-1528:2020 [9] (7.2.4.2 de l'IEC/IEEE 63195-1:2021);

NOTE 1 Le 7.2.4.2 de l'IEC/IEEE 63195-1:2021 spécifie également la distance entre le DUT et la surface d'évaluation plane.

- b) une surface plane qui peut être plus petite que la surface interne du fantôme elliptique si l'application d'une surface plus petite peut être justifiée;

NOTE 2 Une surface plus petite que la surface interne du fantôme elliptique peut être justifiée si le DUT ou ses éléments rayonnants sont plus petits que le fantôme elliptique.

- c) surface de la version modifiée de l'enveloppe interne du fantôme du mannequin anthropomorphique spécifique (SAM) pour les dispositifs utilisés à l'oreille [9] (7.2.4.3 de l'IEC/IEEE 63195-1:2021);

NOTE 3 Des exemples pour le positionnement du DUT par rapport à la surface d'évaluation ou au fantôme peuvent être consultés en 7.2.4 de l'IEC 62209-1528:2020 [9].

- d) surfaces d'évaluation spécifiques pour les dispositifs utilisés à proximité d'autres régions du corps ou de régions de la tête autres que l'oreille, pour lesquels l'application de l'une des zones de moyennage susmentionnées est susceptible de ne pas donner une évaluation appropriée de l'exposition (7.2.4.4 et 7.2.4.5 de l'IEC/IEEE 63195-1:2021).

Pour les surfaces d'évaluation ouvertes, comme la surface du fantôme elliptique décrit dans l'IEC 62209-1528:2020 [9], le vecteur normal à la surface pointe vers la direction opposée au DUT. Pour les surfaces d'évaluation fermées, comme la version modifiée de l'enveloppe interne du fantôme SAM, le vecteur normal à la surface pointe vers l'intérieur du volume contenu dans la surface.

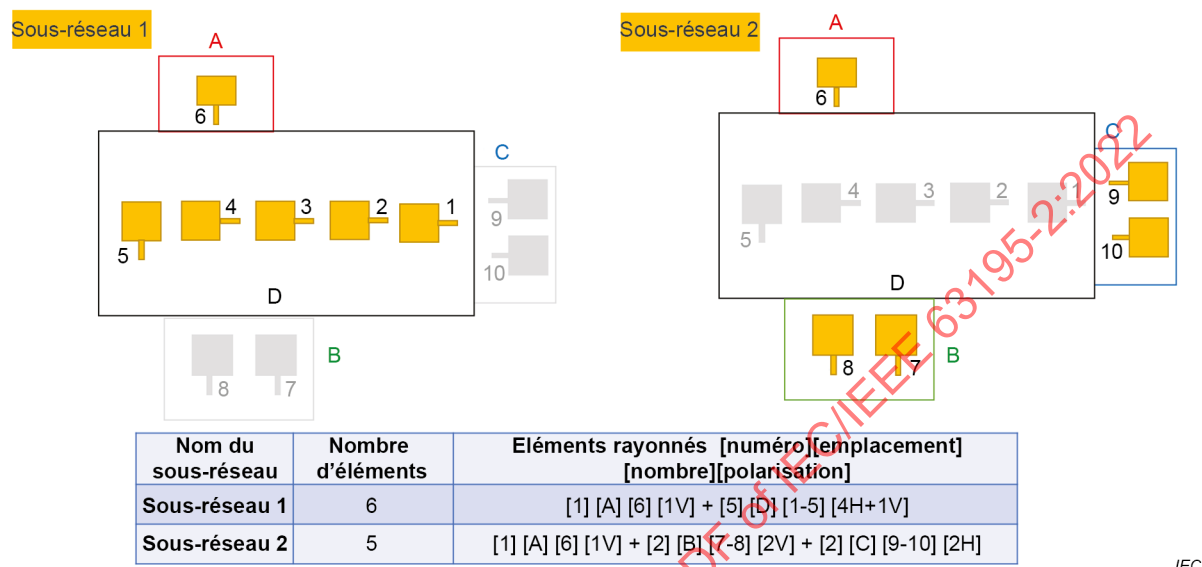
Les coordonnées de l'enveloppe interne du fantôme SAM avec une oreille adaptée ainsi que leurs lignes normales à la surface sont fournies dans un fichier supplémentaire (voir Annexe I). La densité de puissance moyennée dans l'espace sPD doit être évaluée pour toutes les configurations d'essai décrites en 8.2. Le calcul de la $psPD$ conformément au 8.3, au 8.4, au 8.5 et au 8.6 est généralement effectué automatiquement par un logiciel de calcul. Le logiciel doit être conforme aux méthodes spécifiées en 8.6 et doit être vérifié conformément à l'Annexe A.

8.2 Essais à réaliser et configurations du DUT

8.2.1 Généralités

Les essais à réaliser doivent être choisis conformément au 7.3.1 et au 7.3.2 de l'IEC/IEEE 63195-1:2021, puis modélisés en conséquence. Le 7.3.1 de l'IEC/IEEE 63195-1:2021 spécifie le choix de la bande de fréquences, de la surface d'évaluation et des configurations d'antenne à évaluer.

Des recommandations spécifiques concernant l'évaluation de la $psPD$ des dispositifs avec un élément rayonnant unique ou des réseaux ou sous-réseaux d'antennes (plusieurs éléments rayonnants) qui ne fonctionnent pas simultanément sont spécifiées en 8.2.2. En général, pour les dispositifs équipés de plusieurs éléments rayonnants ou réseaux ou sous-réseaux d'antennes, l'évaluation de la $mpsPD$ est spécifiée en 8.2.3 et en 8.2.4. La Figure 3 donne un exemple de configurations d'éléments rayonnants dans différentes configurations de sous-réseaux d'antennes.



IEC

Figure 3 – Exemple de configurations d'éléments rayonnants en différents sous-réseaux d'antenne sur le même DUT

8.2.2 Dispositifs avec un élément rayonnant unique ou avec plusieurs éléments qui ne fonctionnent pas simultanément

Pour les DUT avec un élément rayonnant unique ou des réseaux ou sous-réseaux d'antennes (plusieurs éléments rayonnants) qui ne fonctionnent pas simultanément, la $psPD$ d'une configuration d'essai particulière doit être évaluée comme suit:

- calculer la distribution du champ du DUT et calculer séparément la $psPD$ pour chaque élément actif, conformément au 8.3, au 8.4, au 8.5 et au 8.6;
- normaliser chaque $psPD$ à sa P_R (7.3);
- consigner la $psPD$ de tous les éléments évalués.

8.2.3 Dispositifs avec des réseaux ou sous-réseaux d'antenne

L'évaluation de la $mpsPD$ des dispositifs avec des réseaux ou sous-réseaux d'antennes est décrite à la Figure 4. La sPD doit être calculée séparément pour chaque canal RF et pour chaque antenne. La $mpsPD$ doit alors être déterminée en superposant les champs calculés n_e dans le cadre de l'application d'une technique de maximisation spécifiée à l'Annexe C.

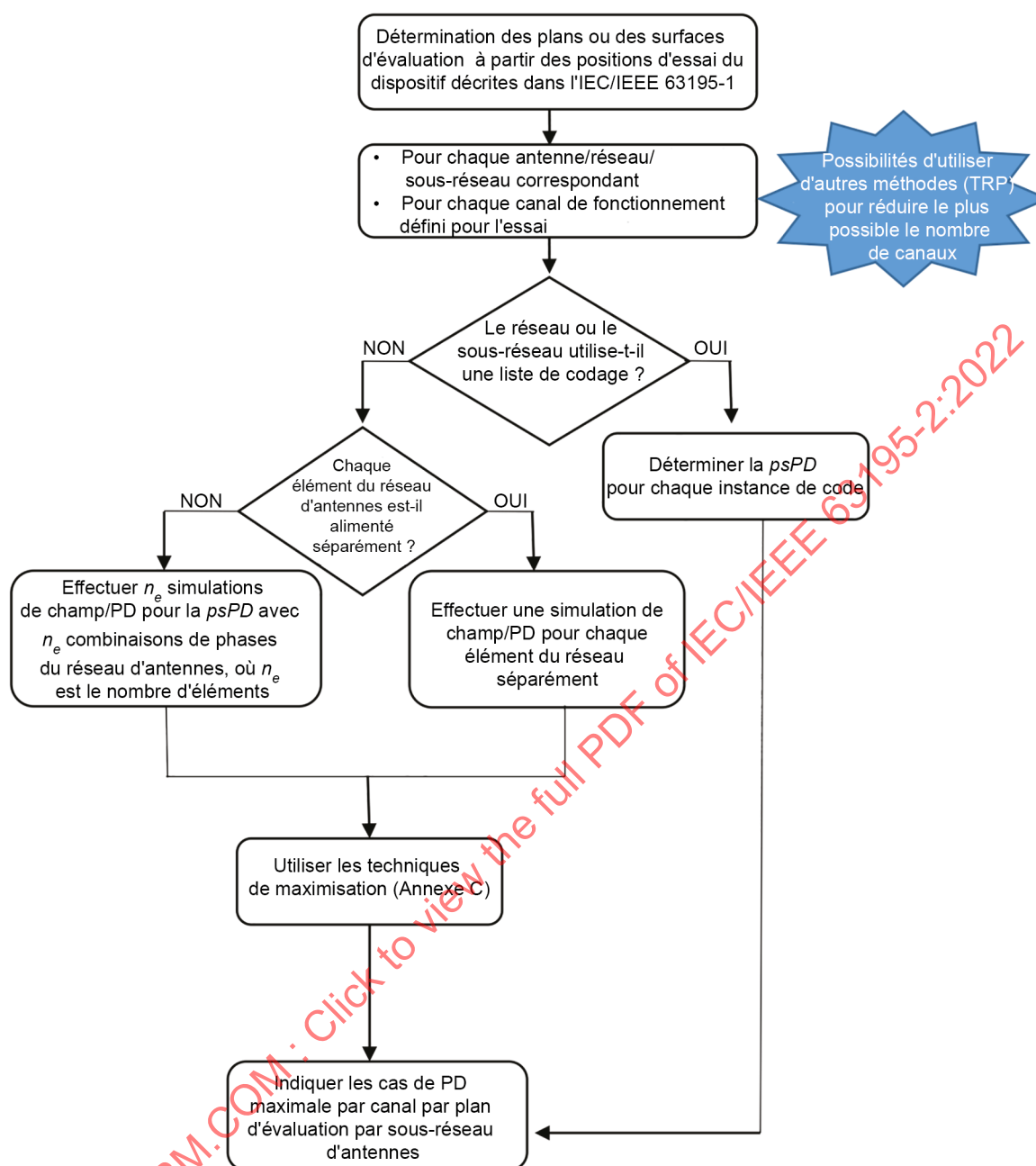


Figure 4 – Logigramme de l'évaluation de la densité de puissance pour les DUT avec des réseaux ou sous-réseaux d'antennes décrits en 8.2.3

8.2.4 Dispositifs avec plusieurs antennes ou plusieurs émetteurs

Des considérations supplémentaires s'appliquent aux dispositifs avec plusieurs antennes non corrélées ou plusieurs émetteurs ou sources qui fonctionnent indépendamment et qui peuvent fonctionner dans différentes plages de fréquences. Leur exposition doit être combinée et indiquée en fonction du rapport d'exposition totale, qui est défini en 7.5 de l'IEC/IEEE 63195-1:2021. Si une évaluation du DAS est exigée pour le calcul du rapport d'exposition totale, les résultats calculés ou expérimentaux du DAS peuvent être appliqués. Les procédures de l'IEC/IEEE 62704-1:2017 ou de l'IEC/IEEE 62704-4:2020 doivent être suivies pour l'évaluation par calcul du DAS et les procédures de l'IEC 62209-1528:2020 [9] doivent être appliquées pour les mesures du DAS.

8.3 Considérations relatives à la surface d'évaluation et aux dimensions du domaine de calcul

Pour le calcul de la $psPD$, il n'est pas nécessaire que la surface d'évaluation soit entièrement contenue dans le domaine de calcul. Les composantes de champ y sont calculées directement par la méthode de calcul ou par des techniques d'expansion qui appliquent le principe de l'équivalence des surfaces. Le positionnement de la surface d'évaluation par rapport au DUT doit être effectué conformément au 7.2.4 de l'IEC/IEEE 63195-1:2021. Pour plus d'informations, voir 8.1.

Dans le champ lointain d'un DUT, la $psPD$ est susceptible de se produire dans la direction du faisceau principal. Dans le champ proche, elle peut être située en tout point au-dessus de la surface du DUT. Selon la distribution du champ, la plage dynamique du diagramme de rayonnement et les dimensions du domaine de calcul, les conditions aux limites absorbantes peuvent introduire des incertitudes importantes pour l'évaluation de la $psPD$; ces incertitudes sont prises en compte dans le bilan d'incertitude de calcul (9.2.3). Les champs à l'extérieur du domaine de calcul qui sont déterminés en appliquant le principe de l'équivalence des surfaces sont soumis aux mêmes sources d'incertitude de calcul.

Si la surface d'évaluation n'est pas entièrement incluse dans le domaine de calcul et que le champ électrique et le champ magnétique y sont évalués au moyen du principe de l'équivalence des surfaces, le domaine de calcul doit être choisi de telle sorte que le champ réactif du DUT ne soit pas coupé par les conditions aux limites absorbantes. L'extension du champ réactif n'est pas préalablement connue. Par conséquent, les dimensions du domaine de calcul doivent être déterminées par une série de calculs avec des dimensions croissantes du domaine du calcul. Les dimensions du champ proche peuvent être identifiées par comparaison du rapport entre les amplitudes locales du champ électrique et du champ magnétique et l'impédance d'onde de l'espace libre.

8.4 Moyennage de la densité de puissance sur une surface d'évaluation

8.4.1 Généralités

La $psPD$ est évaluée comme la valeur maximale absolue de la sPD , qui est calculée sur une surface d'évaluation pour une zone de moyennage de taille et de forme données. La surface d'évaluation est spécifiée en 8.1. Pour le calcul de la sPD , la puissance qui traverse la surface est calculée par intégration calculée de la densité de puissance PD sur une surface $\hat{A}$ dans la zone de moyennage A_{av} . La taille de la zone de moyennage A_{av} est spécifiée dans les lignes directrices applicables en matière d'exposition [7], [8] comme 1 cm^2 ou 4 cm^2 selon la fréquence de fonctionnement du DUT. Selon la forme de la surface d'évaluation, deux approches différentes sont appliquées pour la construction de la zone de moyennage:

- a) si la surface d'évaluation est entièrement plane, la zone de moyennage a la forme d'un carré de dimension d'arête $a_{av} = \sqrt{A_{av}}$. La zone de moyennage carrée doit être pleinement contenue dans la surface d'évaluation. Pour plus d'informations, voir 8.4.2.1. Dans ce cas, la zone de $\hat{A}$ est identique à la zone de moyennage A_{av} ;
- b) si la surface d'évaluation n'est pas entièrement plane, la zone de moyennage est construite comme l'intersection de la surface d'évaluation avec une sphère de rayon $r_{av} = \sqrt{A_{av}/\pi}$. Le point central de la sphère est un point sur la surface d'évaluation, et la zone $\hat{A}$ est la région de la surface d'évaluation qui est contenue dans la sphère. La zone $\hat{A}$ peut s'écarter de A_{av} .

NOTE 1 En règle générale, la zone de moyennage de forme carrée est appliquée sur une surface établie par un fantôme plat. L'intersection avec une sphère est appliquée lors du moyennage (sur l'enveloppe interne de la tête du SAM, par exemple).

NOTE 2 L'algorithme de moyennage des surfaces d'évaluation planes qui utilise un moyennage carré dans le présent document est spécifié pour s'aligner sur les définitions de la forme de la zone de moyennage données dans les lignes directrices en matière d'exposition [7], [8]. Même si les lignes directrices prévoient l'application d'une zone de moyennage carrée sur les surfaces d'évaluation non planes, il est important de noter qu'une sphère est utilisée pour les surfaces d'évaluation non planes pour construire la forme de la zone de moyennage afin de conserver la mise en œuvre de l'algorithme simple. La spécification d'un algorithme de moyennage pour les surfaces d'évaluation non planes par rapport à un cube rotatif est prévue pour la révision du présent document. Un tel algorithme donnerait une zone de moyennage proche d'une forme carrée sur les surfaces d'évaluation non planes. Une spécification est suggérée à l'Annexe G.

La surface d'évaluation ou des parties de celle-ci peuvent être contenues dans le domaine de calcul. Les champs électriques et magnétiques sur la surface d'évaluation à l'extérieur du domaine de calcul doivent être calculés au moyen du principe de l'équivalence des surfaces.

8.4.2 Construction de la zone de moyennage sur une surface d'évaluation

8.4.2.1 Surface d'évaluation plane

Pour l'évaluation de la sPD sur une surface d'évaluation plane, la zone de moyennage doit être construite comme un carré de dimension d'arête $a_{av} = \sqrt{A_{av}}$ autour de chaque point central. Les points centraux sont les sommets de la surface d'évaluation triangulée, et le carré doit être pleinement contenu dans la surface d'évaluation.

NOTE L'IEC TR 63170:2018 [2] spécifie l'intersection avec la sphère ou le cercle.

La surface d'évaluation doit être triangulée. Les dimensions d'arête des triangles ne doivent pas dépasser la longueur d_T , qui doit être égale à 1 mm ou $\lambda/10$ (si cette valeur est plus faible). Le carré doit être pivoté autour de son point central par paliers d'au plus 5° afin de trouver l'orientation qui maximise la puissance traversant le carré. Si l'un des points d'angle du carré se trouve à l'extérieur de la surface d'évaluation pour l'un des angles de rotation, aucune sPD ne doit être calculée pour le point central du carré, même si le carré est pleinement contenu dans la surface d'évaluation pour un ou plusieurs angles d'orientation.

Les points de triangulation peuvent coïncider avec les nœuds d'un maillage cartésien. Outre la triangulation, la surface d'évaluation peut être subdivisée en rectangles de dimension d'arête maximale d_T .

L'Article D.1 fournit des exemples d'algorithmes pour la construction de la zone de moyennage sur une surface d'évaluation plane. La mise en œuvre de l'algorithme doit être vérifiée conformément aux étalons de vérification de l'algorithme de moyennage de la densité de puissance spécifiés en A.6.2.

8.4.2.2 Surface d'évaluation non plane

Pour l'évaluation de la sPD sur une surface d'évaluation non plane, un algorithme de triangulation peut être utilisé pour trianguler la surface d'évaluation. Les dimensions d'arête des triangles ne doivent pas dépasser la longueur d_T , qui doit être égale à 1 mm ou $\lambda/10$ (si cette valeur est plus faible). Les zones de moyennage doivent être construites autour de chaque point central sur la surface d'évaluation à l'aide d'une sphère de taille fixe et d'un rayon $r_{av} = \sqrt{A_{av}/\pi}$. Les points centraux sont les sommets de la surface d'évaluation triangulée.

La zone de la section de la sphère qui contient le point central est de taille A_{av} . La sPD doit alors être évaluée en déterminant la zone de la surface d'évaluation qui est contenue dans la sphère (Figure 5). Seuls ces triangles doivent être pris en compte pour le moyennage; ils sont connectés au triangle qui contient le point central par d'autres triangles pleinement contenus dans la sphère. Les triangles sont considérés comme connectés s'ils partagent un sommet.

NOTE La connexion de tous les triangles de la zone de moyennage au triangle contenant le point central par les triangles contenus dans la sphère évite les zones de moyennage disjointes qui peuvent se produire dans les doigts voisins par exemple.

L'Article D.2 fournit des exemples d'algorithmes pour la construction des zones d'évaluation sur une surface non plane. La mise en œuvre de l'algorithme doit être vérifiée conformément aux étalons de vérification de l'algorithme de moyennage de la densité de puissance spécifiés en A.6.3.

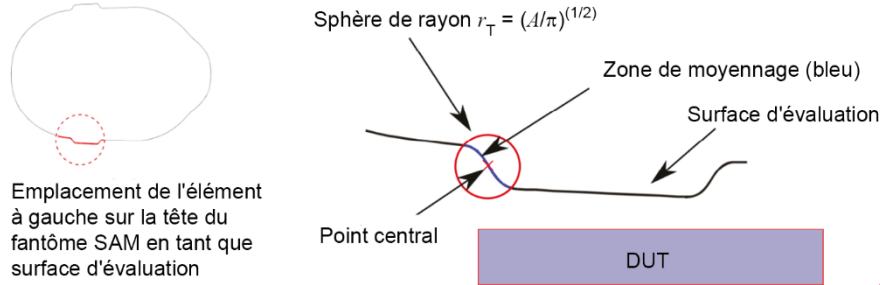


Figure 5 – Exemple de construction de la zone de moyennage dans une sphère de rayon fixe conformément au 8.4

8.5 Calcul de la sPD par intégration du vecteur de Poynting

8.5.1 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 de l'exposition dans le champ proche du DUT, les 8.5.2, 8.5.3 et 8.5.4 spécifient les expressions pour le calcul de la sPD pour les différentes spécifications de la PD . Les fonctions de pondération des intégrantes des expressions des 8.5.2, 8.5.3 et 8.5.4 évitent les contributions des régions où le vecteur de Poynting est orienté vers l'extérieur par rapport à la surface d'évaluation, ou en raison d'inexactitudes de calcul concernant les surfaces qui sont presque parallèles à la direction du vecteur de Poynting, en réduisant l'intégrante dans ces régions à zéro.

NOTE 1 Les zones des triangles (8.4.2) sur lesquels l'intégrante est réduite ou mise à zéro par une fonction de pondération contribuent pleinement à la zone de moyennage.

NOTE 2 L'IEC TR 63170:2018 [2] ne prend pas en compte la direction du vecteur de Poynting par rapport à l'orientation de la surface d'évaluation. Cela correspond à la définition sur 1 des fonctions de pondération des expressions du 8.5.2 et du 8.5.3.

NOTE 3 L'expression utilisée pour calculer la PD peut dépendre des lignes directrices applicables en matière d'exposition ou des réglementations nationales.

8.5.2 Densité de puissance dans la direction de propagation de la normale à la surface dans la surface d'évaluation, sPD_{n+}

La densité de puissance dans la direction de propagation de la normale à la surface dans la surface d'évaluation, sPD_{n+} , doit être calculée conformément à la Formule (4):

$$sPD(r_0) = \frac{1}{\hat{A}(r_0)} \int_{\hat{A}(r_0)} \Re\{S(r)\} \cdot n_A(r) \cdot \Theta[\Re\{S(r)\} \cdot n_A(r)] d\hat{A}(r) \quad (4)$$

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 le carré ou l'intersection de la sphère et de la surface d'évaluation directement connectée à l'emplacement r , c'est-à-dire la somme des zones des triangles à l'intérieur de la sphère qui sont prises en compte pour le calcul de la sPD 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 dans le fantôme défini dans l'IEC TR 63170:2018 [2] correspond à sPD_{n+} avec $\Theta(x) = 1$.

NOTE 2 La Formule (4) correspond à la densité de puissance traversant une surface A , c'est-à-dire l'énergie par unité de temps et par unité de surface traversant une surface d'aire A_{av} .

8.5.3 Densité de puissance de propagation totale dans la surface d'évaluation, sPD_{tot+}

La densité de puissance de propagation totale dans la surface d'évaluation, sPD_{tot+} , doit être calculée conformément à la Formule (5), ainsi qu'à la Formule (6) et à la Formule (7).

$$sPD(r_0) = \frac{1}{\hat{A}(r_0)} \int_{A(r_0)} \|\Re\{S(r)\}\| \cdot \Xi\left\{\cos^{-1}[n_R(r) \cdot n_A(r)]\right\} d\hat{A}(r) \quad (5)$$

où:

$$n_R(r) = \Re\{S(r)\} / \|\Re\{S(r)\}\| \quad (6)$$

$$\Xi(\theta) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \theta < 85^\circ \\ 1 - (\theta - 85^\circ)/5^\circ, & 85^\circ \leq \theta < 90^\circ \\ 0, & \theta \geq 90^\circ \end{cases} \quad (7)$$

$\|\Re\{S(r)\}\|$ est l'amplitude de la partie réelle du vecteur de Poynting complexe S à l'emplacement r ;

les autres termes sont spécifiés au 8.5.2.

NOTE 1 La densité de puissance de propagation totale dans la surface d'évaluation définie dans l'IEC TR 63170:2018 [2] correspond à sPD_{tot+} avec $\Xi(\theta) = 1$.

NOTE 2 La Formule (5) correspond à l'amplitude de la partie réelle du vecteur de Poynting sur une surface A , c'est-à-dire qu'elle fournit une surestimation de la Formule (4).

8.5.4 Densité de puissance totale dirigée vers le fantôme en tenant compte de l'exposition dans le champ proche, sPD_{mod+}

La grandeur sPD_{mod+} se base sur la densité de puissance totale et tient également compte de la partie imaginaire du vecteur de Poynting pour expliquer le transfert d'énergie sans propagation dans la région de champ proche réactif. Elle doit être calculée conformément à la Formule (8).

$$sPD(r_0) = \frac{1}{\hat{A}(r_0)} \int_{A(r_0)} \left[\left(\|\Re\{S(r)\}\| \cdot \Xi\left\{\cos^{-1}[n_R(r) \cdot n_A(r)]\right\} \right)^2 + \left(\|\Im\{S(r)\}\| \right)^2 \right]^{1/2} d\hat{A}(r) \quad (8)$$

où:

$\|\Im\{\mathbf{S}(\mathbf{r})\}\|$ est l'amplitude de la partie imaginaire du vecteur de Poynting complexe $\mathbf{S}$ à l'emplacement $\mathbf{r}$;

les autres termes sont spécifiés au 8.5.2 et au 8.5.3.

NOTE La Formule (8) correspond à l'amplitude du vecteur de Poynting (parties réelle et imaginaire) sur une surface A , c'est-à-dire une surestimation de la Formule (4) et de la Formule (5).

8.6 Logiciel

Le logiciel qui met en œuvre le moyennage de la densité de puissance conformément au 8.4 doit faire référence au présent document, à [7], à [8] et à [10], le cas échéant. Le logiciel doit fournir les options de moyennage suivantes dans son interface utilisateur graphique ou dans son interface de ligne de commande.

a) Construction de la zone de moyennage à partir des éléments suivants:

- "sq": carré rotatif pour les surfaces d'évaluation planes (8.4.2.1);
- "circ": sphère pour les surfaces d'évaluation non planes (8.4.2.2).

b) Calcul de la SPD à partir des éléments suivants:

- sPD_{n+} ("area": "circ" ou "sq"): densité de puissance de propagation de la normale à la surface dirigée vers le fantôme, moyennée sur une "zone" en cm² (par exemple, 1 cm² ou 4 cm²) avec l'intersection de la sphère (circ) ou du cube (sq) (8.5.2);
- sPD_{tot+} ("area": "circ" ou "sq"): densité de puissance de propagation totale dirigée vers le fantôme, moyennée sur une "zone" en cm² (par exemple, 1 cm² ou 4 cm²) avec l'intersection de la sphère (circ) ou du cube (sq) (8.5.3);
- sPD_{mod+} ("area": "circ" ou "sq"): moyennée sur une "zone" en cm² (par exemple, 1 cm² ou 4 cm²) avec l'intersection de la sphère (circ) ou du cube (sq) (8.5.4).

Les options de l'interface utilisateur graphique du logiciel doivent être nommées conformément à la liste ci-dessus. Les fonctions de l'interface de ligne de commande doivent être documentées en se référant aux paragraphes applicables du présent document.

Le logiciel doit afficher un message d'avertissement si les dimensions choisies de la zone de moyennage A_{av} ne sont pas conformes au [7], au [8] ou au présent document, compte tenu des dimensions de 1 cm² ou 4 cm², de la fréquence d'évaluation, et si le moyennage plan est appliqué sur une surface non plane ou si le moyennage non plan est appliqué sur une surface plane. Des exemples de mise en œuvre sont donnés à l'Annexe D.

9 Evaluation de l'incertitude

9.1 Généralités

Les procédures décrites pour l'évaluation de l'incertitude de calcul sont fondées sur celles de l'IEC/IEEE 62704-1:2017 et de l'IEC/IEEE 62704-4:2020 et ont été adaptées aux exigences particulières du présent document en ce qui concerne la FDTD et la FEM. Elles comprennent l'évaluation de la contribution à l'incertitude des paramètres de calcul (9.2), de la contribution à l'incertitude de la représentation par calcul du DUT (9.3) et de l'incertitude de la maximisation de la $psPD$ (9.4).

L'évaluation de la contribution à l'incertitude de la représentation par calcul du DUT due aux paramètres de calcul spécifiés en 9.2 est exigée a) pour la validation du modèle de calcul conformément au 7.5.3 et b) pour l'évaluation de l'incertitude globale de la $mpsPD$. Par conséquent, les procédures du 9.2 s'appliquent à la fois à l'évaluation de la sPD et de la $mpsPD$.

9.2 Incertitude de la sPD et de la $mpsPD$ due aux paramètres de calcul

9.2.1 Contributions à l'incertitude dues aux paramètres de calcul

Le Tableau 1 spécifie le bilan d'incertitude des contributions des paramètres de calcul aux résultats du montage de validation ou du montage d'essai. Les détails relatifs à la quantification des composantes d'incertitude sont décrits aux 9.2.2, 9.2.3, 9.2.4, 9.2.5, 9.2.6, 9.2.7 et 9.2.8.

Tableau 1 – Bilan des contributions à l'incertitude de l'algorithme de calcul pour le montage de validation ou le montage d'essai

a	b	c	d	e	f	g	h
Composante d'incertitude	Paragraphe	Tolérance %	Loi de probabilité	Diviseur	c_i	Incertitude %	v_i ou v_{eff}
Résolution du maillage	9.2.2		N	1	1		
ABC	9.2.3		N	1	1		
Bilan de puissance	9.2.4		N	1	1		
Troncature du modèle	9.2.5						
Convergence	9.2.6		R	1,73	1		
Éléments diélectriques du DUT	9.2.7		N	1	1		
Conducteurs avec pertes	9.2.8		R	1,73	1		
Incertitude type composée ($k = 1$)							
Les colonnes c, g et h doivent être remplies en fonction des résultats des calculs du DUT. NOTE 1 Les en-têtes des colonnes a à h sont donnés à titre de référence. NOTE 2 Abréviations utilisées dans le Tableau 1: N – loi de probabilité normale; R – loi de probabilité rectangulaire NOTE 3 Le diviseur est fonction de la loi de probabilité (d) et des degrés de liberté (v_i et v_{eff}) (h). NOTE 4 c_i est le coefficient de sensibilité qui est appliqué pour convertir la variabilité de la composante d'incertitude en variabilité de la sPD ou de la $mpsPD$.							

9.2.2 Résolution du maillage

9.2.2.1 Maillages FEM

La densité du maillage a un impact majeur sur l'exactitude des résultats. Par conséquent, il est nécessaire de comparer les résultats de sPD et de $mpsPD$ obtenus avec un maillage initial donné M aux résultats de $psPD$ obtenus avec un maillage plus dense M' . L'une des deux stratégies suivantes doit être appliquée selon que le code FEM utilisé pour l'évaluation s'appuie ou non sur le raffinement du maillage adaptatif.

- Si le code FEM appliqué ne s'appuie pas sur le raffinement du maillage adaptatif, le nombre d'éléments constitutifs du maillage par longueur d'onde utilisé pour le maillage initial M doit être augmenté d'au moins 50 % compte tenu des longueurs d'onde respectives des éléments diélectriques.

- b) Si le code FEM appliqué s'appuie sur le raffinement du maillage adaptatif, des passes adaptatives supplémentaires doivent être effectuées jusqu'à ce que le nombre d'éléments constitutifs du maillage ait augmenté d'au moins 20 % pour le deuxième ou troisième ordre inférieur et de 50 % pour l'ordre inférieur.

Dans les deux cas, la PD doit être enregistrée dans la région où la valeur maximale de sPD ou de $mpsPD$ est attendue. Les dimensions d'arête minimale et maximale de cette région et de la région autour de l'antenne du maillage plus dense M' doivent être inférieures ou égales à 50 % des dimensions d'arête correspondantes de M . L'emplacement de la valeur maximale de sPD ou de $mpsPD$ dans la région du maillage M' ne doit pas s'écarter de plus de la dimension d'arête minimale du maillage par rapport à l'emplacement du champ électrique maximal dans la région correspondante du maillage M . L'écart maximal de la sPD ou de la $mpsPD$ doit être indiqué dans le Tableau 1 comme l'incertitude avec une loi de probabilité rectangulaire.

9.2.2.2 Maillages FDTD

L'effet de la résolution du maillage doit être déterminé en augmentant le nombre total de mailles par un facteur de deux par rapport au calcul initial. Le raffinement du maillage qui conduit à l'augmentation du nombre de mailles doit être appliqué dans la région de la sPD ou de la $mpsPD$ maximale. Les dimensions d'arête minimale et maximale de cette région et de la région autour de l'antenne du maillage plus dense M' doivent être inférieures ou égales à 50 % des dimensions d'arête correspondantes de M . L'emplacement de la valeur maximale de sPD ou de $mpsPD$ dans la région du maillage M' ne doit pas s'écarter de plus de la dimension d'arête minimale du maillage par rapport à l'emplacement du champ électrique maximal dans la région correspondante du maillage M .

L'écart maximal de la sPD ou de la $mpsPD$ doit être indiqué dans le Tableau 1 en retenant l'hypothèse d'une loi de probabilité normale.

9.2.3 Conditions aux limites absorbantes

L'impact des conditions aux limites absorbantes doit être déterminé en déplaçant les limites vers l'extérieur de $\lambda/4$ dans toutes les directions. L'écart maximal de la sPD ou de la $mpsPD$ doit être indiqué dans le Tableau 1 en retenant l'hypothèse d'une loi de probabilité rectangulaire.

NOTE L'emplacement de l'énergie électrique ou magnétique maximale sur la limite peut correspondre au faisceau principal d'une structure rayonnante ou à son champ réactif.

9.2.4 Bilan de puissance

La puissance fournie dans le domaine de calcul doit être enregistrée au niveau des sources (P_M ou P_O). La somme de la puissance absorbée dans les éléments diélectriques avec pertes, les conducteurs avec pertes et les composants passifs du domaine de calcul et rayonnée dans les ABC doit être enregistrée et comparée à P_M ou P_O . L'écart doit être indiqué dans le Tableau 1 en retenant l'hypothèse d'une loi de probabilité normale.

Lors de la simulation de dispositifs avec plusieurs sources fonctionnant simultanément, il est recommandé d'exciter chaque accès séparément tout en chargeant les accès inactifs avec l'impédance de référence afin de calculer l'ensemble de la matrice- S du système multiaccès. Ainsi, la $psPD$ et le bilan de puissance d'un vecteur d'excitation donné peuvent être calculés en superposant les champs pour tout vecteur d'excitation et toute charge. Pour plus d'informations, voir [10], par exemple.

9.2.5 Troncature du modèle

L'impact de la troncature du modèle sur la sPD ou la $mpsPD$ doit être évalué par une comparaison appropriée au modèle non tronqué. Voir l'étape g) du 7.2.

9.2.6 Convergence

9.2.6.1 Résolveurs FEM dans le domaine fréquentiel

Pour les maillages FEM, l'incertitude de convergence est déjà couverte par l'incertitude de résolution du maillage (9.2.1). Aucune contribution supplémentaire à l'incertitude ne doit être appliquée.

9.2.6.2 Calculs FDTD avec excitation harmonique

Les composantes vectorielles du champ électrique doivent être enregistrées dans le domaine temporel dans la région où se trouve la valeur maximale de la sPD ou de la $mpsPD$. La valeur absolue du vecteur doit être calculée à chaque pas de temps. Pour un calcul suffisamment convergent, l'écart des trois dernières valeurs locales maximales (du signal dans le domaine temporel) des carrés des valeurs absolues des champs électriques par rapport à leur valeur moyenne ne doit pas être supérieur à 2 % et les valeurs maximales doivent se trouver dans le même voxel. Si le calcul ne peut pas être réalisé pendant une durée suffisante pour atteindre un écart inférieur à 2 %, une justification doit être donnée dans le rapport d'essai, expliquant pourquoi une tolérance assouplie peut être utilisée pour l'application particulière en essai afin d'exclure les calculs de configuration incorrecte, c'est-à-dire dans quelle mesure la convergence contribue à la grandeur cible.

9.2.6.3 Calculs FDTD avec excitation à large bande

Pour les calculs à large bande avec évaluation de la sPD ou de la $mpsPD$ par transformation de Fourier, un signal avec une enveloppe en forme d'impulsion est utilisé pour l'excitation. Les composantes du champ électrique doivent être enregistrées dans le domaine temporel, comme cela est décrit en 9.2.6.2. Si la sPD ou la $mpsPD$ est évaluée à plusieurs fréquences, les variations de l'emplacement de la grandeur cible en fonction de la fréquence doivent être prises en compte. Pour l'évaluation de l'incertitude, la transformation de Fourier discrète (TFD) du signal dans le domaine temporel doit être calculée pour des longueurs de fenêtrage t_w croissantes de $t_0 = 0$ à $t_w = 1,25 \times n \times T$. T est la période de la fréquence d'évaluation et n est un nombre entier qui doit être augmenté jusqu'à ce que t_w atteigne la fin de la durée calculée ou jusqu'à ce que la limite de convergence ait été atteinte. L'écart des deux dernières valeurs absolues au carré des résultats de la TFD à la fréquence d'évaluation par rapport à leur valeur moyenne ne doit pas être supérieur à 2 % pour un calcul suffisamment convergent. Si le calcul ne peut pas être réalisé pendant une durée suffisante pour atteindre un écart inférieur à 2 %, une justification doit être donnée dans le rapport d'essai, expliquant pourquoi une tolérance assouplie est utilisée pour l'application particulière en essai afin d'exclure les calculs de configuration incorrecte.

9.2.6.4 Consignation de l'incertitude de convergence

L'écart doit être indiqué dans le Tableau 1 comme l'incertitude avec une loi de probabilité rectangulaire.

L'emplacement de la sPD ou de la $mpsPD$ n'étant en général pas connu préalablement, il est recommandé de choisir la région pertinente de manière à ce qu'elle soit suffisamment grande pour éviter les calculs répétés. Des calculs d'essai avec des maillages plus grossiers ou une géométrie simplifiée peuvent permettre de limiter les dépenses de calcul en vue d'identifier les régions pertinentes pour l'enregistrement des signaux.

9.2.7 Propriétés diélectriques

Les propriétés diélectriques du modèle du DUT sont généralement impactées par des incertitudes selon leur spécification. L'impact de ces incertitudes sur la *sPD* ou la *mpsPD* doit être évalué en appliquant la conductivité et la permittivité minimales et maximales (quatre combinaisons différentes). Les valeurs minimales et maximales doivent être choisies en fonction de l'incertitude indiquée dans la documentation de référence des propriétés diélectriques, par exemple fiche technique ou publication. Afin d'éviter d'avoir recours à des calculs excessivement nombreux pour les structures qui possèdent un grand nombre d'éléments diélectriques différents, les variations de conductivité et de permittivité peuvent être limitées à la région dans laquelle la majeure partie de l'énergie électromagnétique est confinée ou absorbée, ou des méthodes statistiques avancées peuvent être appliquées pour quantifier l'incertitude. Dans ce cas, une justification appropriée doit être fournie. L'écart doit être indiqué dans le Tableau 1 comme l'incertitude avec une loi de probabilité normale.

9.2.8 Conducteurs avec pertes

La conductivité finie des conducteurs du DUT doit varier selon leur spécification. L'impact des incertitudes spécifiées doit être évalué en appliquant la conductivité minimale et maximale de tous les conducteurs du DUT (deux calculs). Les valeurs minimales et maximales doivent être choisies en fonction de l'incertitude indiquée dans la documentation de référence des conducteurs, par exemple fiche technique ou publication. L'écart doit être indiqué dans le Tableau 1 comme l'incertitude avec une loi de probabilité rectangulaire.

9.3 Contribution à l'incertitude de la représentation par calcul du modèle du DUT

La contribution à l'incertitude de la représentation par calcul du DUT doit être déterminée par l'évaluation expérimentale et par calcul de la distribution de la *PD* dans un plan à la mesure de validation de la distance dans le champ proche (7.5.2.2) avec une section des dimensions de la surface d'évaluation sur un maillage rectiligne qui présente des pas d'au plus $\lambda/4$ et au moins 100 points. L'incertitude est évaluée selon la Formule (9).

$$U_d[\%] = 100 \times \max_n \left\{ \frac{\left| v_{\text{meas},n}^2 - v_{\text{sim},n}^2 \right|}{\max \left(\max_n \left| v_{\text{meas},n}^2 \right|, \max_n \left| v_{\text{sim},n}^2 \right| \right)} \right\} \quad (9)$$

où:

$v_{\text{meas},n}^2$ est la *PD* déterminée de façon expérimentale à la position n ou sa solution de référence exacte;

$v_{\text{sim},n}^2$ est la *PD* déterminée par calcul à la position n .

Le pas de maillage mentionné au 9.3 se rapporte au maillage de mesure. Pour l'évaluation par calcul, un maillage plus fin est généralement exigé.

Il convient que la documentation de référence de l'instrumentation utilisée et/ou les normes de mesure appropriées décrivant l'application spécifique de cette approche générale fournissent suffisamment de détails pour contribuer à faciliter l'exactitude du montage de la configuration de référence. Les incertitudes doivent être indiquées dans le Tableau 2.

Tableau 2 – Bilan d'incertitude du modèle développé du DUT

a	b	c	d	e	f	g	h
Composante d'incertitude	Paragraphe	Tolérance %	Loi de probabilité	Diviseur	c_i	Incertainitude %	v_i ou v_{eff}
Modèle du DUT (distribution du champ dans le champ proche)	9.3		N	1	1		
Équipement de mesure et procédure	Conformément à la spécification du fabricant et/ou à la méthodologie appliquée, y compris l'évaluation de la mesure de la puissance conduite ou rayonnée (7.4.3)		N	1	1		
Incertainitude type composée ($k = 1$)							
Les colonnes c, g et h doivent être remplies en fonction des résultats des calculs du DUT. NOTE 1 Les en-têtes des colonnes a à h sont donnés à titre de référence. NOTE 2 Abréviation utilisée dans le Tableau 2: N – loi de probabilité normale NOTE 3 Le diviseur est fonction de la loi de probabilité (d) et des degrés de liberté (v_i et v_{eff}) (h). NOTE 4 c_i est le coefficient de sensibilité qui est appliqué pour convertir la variabilité de la composante d'incertitude en variabilité de la <i>sPD</i> ou de la <i>mpsPD</i>.							

9.4 Incertitude de l'évaluation de l'exposition maximale

Pour les listes de codage de taille relativement réduite, de sorte que la méthode de recherche exhaustive doit être utilisée, l'incertitude de l'évaluation de l'exposition maximale est de zéro.

Pour les listes de codage de trop grande taille pour la méthode de recherche exhaustive, utiliser les méthodes d'optimisation hybrides décrites à l'Annexe C. L'optimisation doit être répétée dix fois dans des conditions initiales aléatoires. La *mpsPD* doit être enregistrée à chaque fois. L'incertitude de l'évaluation à partir de la maximisation du champ doit alors être calculée à l'aide de la Formule (10).

$$U_m [\%] = 100 \times \left\{ \frac{\max_{i=[1,10]} \{mpsPD_i\} - \min_{i=[1,10]} \{mpsPD_i\}}{\max_{i=[1,10]} \{mpsPD_i\}} \right\} \quad (10)$$

où $mpsPD_i$ est la valeur maximale de la *psPD* trouvée par l'optimiseur à la i^e exécution.

9.5 Bilan d'incertitude

Le bilan d'incertitude total doit être calculé à partir des contributions du Tableau 1 et du Tableau 2 et doit être additionné comme cela est indiqué dans le Tableau 3. L'incertitude minimale réalisable dépend du niveau de détail auquel une situation d'exposition particulière peut être calculée. Des incertitudes relativement élevées peuvent se produire, par exemple à partir des propriétés diélectriques ou des pertes par conduction du DUT.

NOTE Des exemples d'application disponibles au moment de l'élaboration du présent document indiquent que les niveaux d'incertitude attendus sont similaires à ceux indiqués dans la NOTE du 7.4 de l'IEC/IEEE 62704-1:2017, c'est-à-dire dans l'ordre d'amplitude de 20 % ($k = 2$). Le niveau de l'incertitude acceptable dépend de l'application. Les révisions du présent document fourniront des valeurs plus robustes de l'incertitude acceptable en fonction des cas d'application et des données publiées.

Tableau 3 – Bilan d'incertitude de calcul

a	b	c	d	e	f	g	h
Composante d'incertitude	Paragraphe	Tolérance %	Loi de probabilité	Diviseur	c_i	Incrtitude %	v_i ou v_{eff}
Configuration d'essai par rapport aux paramètres de calcul	9.2		N	1	1		
Modèle de calcul de la configuration d'essai	9.3		N	1	1		
Maximisation de champ	Annexe C		N	1	1		
Incrtitude type composée ($k = 1$)							
Incrtitude élargie ($k = 2$)							
Les colonnes c, g et h doivent être remplies en fonction des résultats du Tableau 1 et du Tableau 2. NOTE 1 Les en-têtes des colonnes a à h sont donnés à titre de référence. NOTE 2 Abréviation utilisée dans le Tableau 3: N – loi de probabilité normale NOTE 3 Le diviseur est fonction de la loi de probabilité (d) et des degrés de liberté (v_i et v_{eff}) (h). NOTE 4 c_i est le coefficient de sensibilité qui est appliqué pour convertir la variabilité de la composante d'incrtitude en variabilité de la <i>mpsPD</i>.							

10 Rapport

Le rapport d'essai doit contenir la description de toutes les étapes représentant le développement et la validation expérimentale du modèle du DUT, les essais qui ont été réalisés et leurs résultats par rapport aux normes d'exposition applicables ainsi que le bilan d'incrtitude. Ces étapes doivent être décrites de manière à pouvoir reproduire le développement et l'évaluation par calcul du modèle du DUT de manière indépendante. Le rapport d'essai doit contenir les sections suivantes, en détail.

a) Généralités:

- 1) identification du laboratoire d'essai;
- 2) exigences de conformité (normes d'essai, lignes directrices en matière d'exposition, par exemple);
- 3) limites applicables en matière d'exposition (ICNIRP, IEEE/ICES [7], [8], par exemple);
- 4) spécification du plan d'évaluation et des formules de *sPD* (voir 8.3, 8.4, 8.5, 8.6) appliquées pour l'évaluation de la *mpsPD*;
- 5) identification du logiciel utilisé pour les essais, y compris le numéro de version, et déclaration de conformité au présent document;
- 6) identification de l'algorithme pour le calcul de la *mpsPD*.

b) Description du DUT:

- 1) identification du DUT, y compris les numéros de révision du matériel et du logiciel, le numéro de série;
- 2) description du facteur de forme du DUT, ainsi qu'une brève description de sa fonction prévue;
- 3) description des modes de fonctionnement du DUT, comme les bandes de fréquence, le niveau de puissance, les options de formation de faisceau, la liste de codage (le cas échéant);
- 4) description de la documentation technique fournie pour le développement du modèle du DUT, comme la CAO, les données, les schémas des circuits, les fiches techniques.

c) Développement du modèle du DUT:

- 1) vue d'ensemble des parties du DUT qui sont incluses ou exclues du modèle, et justification relative aux parties exclues;
- 2) description de la modélisation des sources, de l'adaptation d'impédance, des parcours des signaux RF et de l'antenne;
- 3) liste des propriétés matérielles diélectriques appliquées avec des références ou une justification de leurs valeurs si aucune référence appropriée n'est disponible;
- 4) paramètres de calcul, comme la résolution du maillage, les critères de convergence, les dimensions du domaine de calcul, les conditions aux limites.

d) Validation du modèle du DUT:

- 1) description des essais qui ont été réalisés et justification de leur choix;
- 2) instrumentation de mesure;
- 3) montage de mesure et protocole;
- 4) comparaison tabulaire et graphique des résultats mesurés et calculés, y compris une déclaration relative à l'applicabilité du modèle du DUT pour l'évaluation de la sPD ;
- 5) plan de référence de la puissance choisi pour la quantification expérimentale de la P_R du DUT, justification du choix et hypothèses exigées pour le calcul de la P_R ;
- 6) description et justification de la réduction du nombre d'essais de validation pour des DUT similaires, conformément au 7.5.4;
- 7) bilans d'incertitude expérimentale et de calcul pour la validation du modèle du DUT.

e) Essais réalisés et résultats:

- 1) description des essais réalisés (positions, surfaces d'évaluation, etc.) conformément au 8.2;
- 2) méthode appliquée pour évaluer la $mpsPD$ (technique de maximisation de champ, optimisation, liste de codage, etc.);
- 3) normalisation de la puissance appliquée des résultats calculés à la sortie du DUT;
- 4) liste de toutes les bandes de fréquences et directions de faisceau soumises à l'essai;
- 5) $mpsPD$ sur l'ensemble des positions d'essai, bandes, modes de fonctionnement et configurations du dispositif, notamment:
 - i) puissance totale rayonnée P_R (évaluation par calcul) du DUT lors du mesurage (évaluation expérimentale);
 - ii) vecteur d'excitation;
 - iii) emplacement et forme de la zone de moyennage de la $mpsPD$, en la mettant en évidence sur la surface d'évaluation dans l'interface utilisateur graphique du logiciel d'évaluation; et
 - iv) algorithme de moyennage appliqué conformément au 8.6.

f) Bilan d'incertitude de calcul de l'évaluation globale de la $mpsPD$.

Annexe A (normative)

Vérification des codes

A.1 Généralités

Le logiciel utilisé pour le calcul de la $psPD$ pour l'évaluation de la densité de puissance des dispositifs sans fil doit être vérifié conformément à l'IEC/IEEE 62704-1:2017 (FDTD) ou à l'IEC/IEEE 62704-4:2020 (FEM). Pour le calcul de la $psPD$ conformément au présent document, des évaluations supplémentaires doivent être effectuées afin de vérifier la mise en œuvre correcte des algorithmes d'interpolation et de superposition (Article A.2 et Article A.3), des pertes métalliques (Article A.4) et des éléments diélectriques anisotropes (Article A.5). Ces vérifications sont exigées pour permettre une évaluation par calcul efficace des systèmes réseau à commande de phase dans la plage de fréquences qui relève du domaine d'application du présent document. En outre, la mise en œuvre de l'algorithme pour le calcul de la $psPD$ conformément à l'Article 7 doit être vérifiée (Article A.6). Ces étalons sont spécifiés de manière à pouvoir être appliqués à la fois aux logiciels reposant sur la FDTD et à ceux reposant sur la FEM.

A.2 Interpolation et superposition des composantes des champs vectoriels

La mise en œuvre correcte de l'interpolation et de la superposition des composantes des champs vectoriels doit être vérifiée en évaluant les champs à partir de trois dipôles $\lambda/2$, D_1 , D_2 et D_3 , qui fonctionnent simultanément à une fréquence de 24 GHz avec différentes amplitudes et différents décalages de phase. Les dipôles doivent avoir une longueur de 6,2 mm. L'axe du premier dipôle doit être aligné sur l'axe z du système de coordonnées, l'axe du deuxième dipôle doit être aligné sur l'axe x du système de coordonnées, centré avec son point d'alimentation à l'origine, et l'axe du troisième dipôle doit être aligné sur l'axe y du système de coordonnées. Les points d'alimentation doivent être placés aux centres des dipôles. Ils doivent être modélisés comme des sources matérielles ou des sources de tension avec une résistance interne finie. Les distances entre les centres des points d'alimentation doivent être de 7,0 mm. La configuration est représentée à la Figure A.1. Dans le cadre de calculs FDTD, l'axe x coupe les points d'alimentation aux centres des dipôles D_1 et D_3 . Pour éviter cette intersection, les points d'alimentation peuvent être modélisés par deux sources qui se suivent avec des signaux égaux. Le point d'alimentation du dipôle D_2 peut également être modélisé par deux sources qui se suivent.

NOTE Un maillage hétérogène (taille de pas du maillage variable) peut être nécessaire pour la discrétisation de cette configuration d'antenne.

Les dipôles doivent être modélisés comme des filaments parfaitement conducteurs: les champs électriques sur leur axe doivent être nuls, de manière à pouvoir prendre pour hypothèse que leur diamètre est significativement plus petit que la dimension des arêtes du maillage dans leurs sections. A défaut, un diamètre de 0,05 mm peut être appliqué. Les dimensions des arêtes ou sommets du maillage peuvent être choisies par le logiciel ou par l'utilisateur.

Les dipôles doivent être excités avec différentes configurations de source, d'amplitude et de phase données dans le Tableau A.1. Les trois dipôles doivent être excités de manière consécutive. Les champs électriques et magnétiques doivent être superposés à l'aide des fonctions intégrées de post-traitement du logiciel en essai.

Les composantes vectorielles x , y et z des champs électriques et magnétiques doivent être évaluées sur deux surfaces cubiques de dimensions d'arête de 10,0 mm et 16,0 mm, centrées à l'origine. Sur les surfaces du cube, les points d'évaluation sont spécifiés sur un treillis rectiligne avec un espacement de 0,5 mm. Toutes les composantes de champ vectoriel électrique et magnétique des champs calculés à l'aide du logiciel en essai doivent être comparées aux résultats de référence sur les six treillis rectilignes du cube. Les résultats de référence sont fournis dans des fichiers supplémentaires (voir Annexe I). Les résultats de référence sont fondés sur les résultats de calcul obtenus à l'aide des codes de la méthode des moments [11], qui ont été validés selon l'IEC/IEEE 62704-1:2017 ou l'IEC/IEEE 62704-4:2020. L'écart maximal des amplitudes du champ électrique et du champ magnétique qui sont supérieures ou égales à 10 % de la valeur maximale des résultats de référence doit être évalué et indiqué dans le Tableau A.1. L'écart maximal admissible par rapport aux résultats de référence est de 10,0 %.

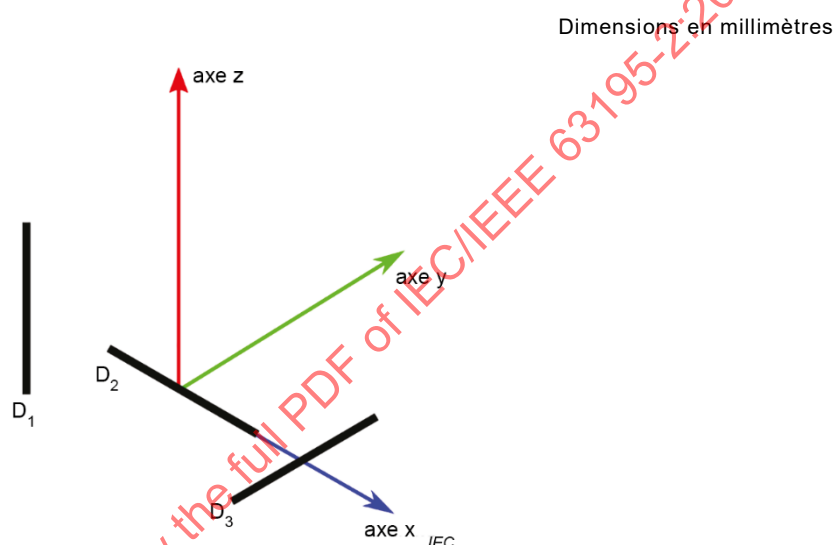


Figure A.1 – Configuration de trois dipôles $\lambda/2$, D_1 , D_2 et D_3 , pour l'évaluation de l'interpolation et de la superposition des composantes du champ électrique et du champ magnétique

Tableau A.1 – Interpolation et superposition des composantes de champ vectoriel; l'écart maximal admissible par rapport aux résultats de référence est de 10 %

Amplitudes et phases	Ecart maximal par rapport à la référence sur le cube de 10 mm		Ecart maximal par rapport à la référence sur le cube de 16 mm	
	amplitude du champ électrique	amplitude du champ magnétique	amplitude du champ électrique	amplitude du champ magnétique
Configuration 1 D_1 : $A = 1 \text{ V}$, $\varphi = 0^\circ$ D_2 : $A = 0,5 \text{ V}$, $\varphi = 90^\circ$ D_3 : $A = 2 \text{ V}$, $\varphi = 180^\circ$				
Configuration 2 D_1 : $A = 2 \text{ V}$, $\varphi = 0^\circ$ D_2 : $A = 2 \text{ V}$, $\varphi = 90^\circ$ D_3 : $A = 2 \text{ V}$, $\varphi = 0^\circ$				
Configuration 3 D_1 : $A = 1 \text{ V}$, $\varphi = 180^\circ$ D_2 : $A = 0,5 \text{ V}$, $\varphi = 90^\circ$ D_3 : $A = 2 \text{ V}$, $\varphi = 180^\circ$				

A.3 Calcul du diagramme de champ lointain et de la puissance rayonnée

Le diagramme de champ lointain et la puissance rayonnée P_R doivent être calculés pour toutes les configurations de dipôles spécifiées dans le Tableau A.1 avec une excitation consécutive et simultanée. Pour une excitation consécutive, les champs doivent être superposés à l'aide des fonctions intégrées du logiciel en essai avant de calculer P_R . Le diagramme de champ lointain doit être calculé en unités des champs électriques sur l'ensemble de l'angle solide par paliers de 10° pour φ et θ , sur l'ensemble de l'angle solide à partir de 0° pour φ et θ . Les résultats de référence sont fournis dans des fichiers supplémentaires (voir Annexe I). Les résultats de référence reposent sur la moyenne des résultats de calcul obtenus à l'aide de la méthode des moments. L'écart maximal des amplitudes de champ électrique qui sont supérieures ou égales à 10 % de la valeur maximale des résultats de référence doit être évalué et indiqué dans le Tableau A.2. L'écart maximal admissible par rapport aux résultats de référence pour les amplitudes de champ et pour la puissance totale rayonnée est de 10,0 %.

Tableau A.2 – Calcul de la P_R ; l'écart maximal admissible par rapport aux résultats de référence est de 10 % pour la puissance rayonnée et pour l'amplitude du champ électrique du diagramme de champ lointain

Excitation	Amplitudes et phases	Puissance calculée en watts	Puissance de référence en watts	Ecart maximal de l'amplitude du champ électrique du diagramme de champ lointain par rapport à la référence
consécutive	$D_1: A = 1 \text{ V}, \varphi = 0^\circ$		0,023 0	
	$D_2: A = 0,5 \text{ V}, \varphi = 90^\circ$			
	$D_3: A = 2 \text{ V}, \varphi = 180^\circ$			
	$D_1: A = 2 \text{ V/m}, \varphi = 0^\circ$		0,052 7	
	$D_2: A = 2 \text{ V/m}, \varphi = 90^\circ$			
	$D_3: A = 2 \text{ V/m}, \varphi = 0^\circ$			
	$D_1: A = 1 \text{ V/m}, \varphi = 180^\circ$		0,023 0	
	$D_2: A = 0,5 \text{ V/m}, \varphi = 90^\circ$			
	$D_3: A = 2 \text{ V/m}, \varphi = 180^\circ$			

A.4 Mise en œuvre des conducteurs avec pertes

La mise en œuvre des conducteurs métalliques à conductivité finie doit être évaluée en modélisant la décroissance de l'amplitude de propagation du mode TTE_{10} dans un guide d'ondes rectangulaire en fonction de la constante de propagation complexe k_z . L'évaluation de k_z suit les procédures spécifiées dans l'IEC/IEEE 62704-1:2017 et l'IEC/IEEE 62704-4:2020.

La constante de propagation complexe doit être évaluée dans le modèle de calcul d'un guide d'ondes R320 de section interne de 7,112 mm × 3,556 mm sur une plage de fréquences de 25 GHz à 40 GHz. Pour la méthode FDTD, un signal à large bande doit être utilisé, et la constante d'affaiblissement $\text{Im}\{k_z\} = \alpha$ doit être évaluée en fonction de la fréquence. Pour la FEM, des fréquences discrètes avec une taille de pas de 250 MHz doivent être évaluées. Toutes les directions et dimensions correspondent au système de coordonnées spécifié à la Figure A.2. L'excitation est placée perpendiculairement à l'orientation du guide d'ondes. La distance entre la source et les champs à enregistrer doit être de 1 778 mm. Il convient de choisir la longueur du guide d'ondes de telle sorte que les champs parasites qui peuvent être provoqués par la troncature du domaine de calcul n'atteignent pas la région où les champs sont enregistrés.

Les parois du guide d'ondes doivent être modélisées comme des conducteurs de conductivités σ de 10^5 S/m, 10^6 S/m et 10^7 S/m. Le guide d'ondes doit être rempli de matériaux diélectriques sans perte de permittivités relatives ε_r de 1 et 2. Pour chaque configuration, le guide d'ondes doit être maillé au moyen d'un maillage fin et d'un maillage grossier, homogènes ou hétérogènes, avec au moins un pas de maillage minimal conformément au Tableau A.3.

Les composantes E_y à l'emplacement de la source (Figure A.3) doivent être excitées à l'aide de la solution analytique du mode TE_{10} . Le mode peut être excité en définissant les composantes E_y à l'emplacement de la source (Figure A.3) sur les valeurs calculées à l'aide de la Formule (A.1):

$$E_y = E_0 \sin \frac{x\pi}{w} \quad (\text{A.1})$$

où:

E_0 est une amplitude spécifiable du vecteur de champ électrique;

x est l'emplacement des composantes x du vecteur de champ électrique;

w est la largeur du guide d'ondes (7,112 mm).

D'autres méthodes d'excitation de champ peuvent être utilisées, comme des solveurs particuliers permettant de déterminer les modes de propagation dans le guide d'ondes ou des sources préconfigurées si le logiciel les fournit. Dans tous les cas, il doit être validé que seul le mode de propagation fondamental existe à l'emplacement où les champs sont enregistrés (Figure A.3), car la présence de modes d'ordre supérieur ou de modes parasites entrave l'évaluation de la constante de propagation. La composante E_y doit être enregistrée aux emplacements spécifiés à la Figure A.3. La constante de propagation complexe k_z peut être calculée à partir des composantes de champ enregistrées aux emplacements de la Figure A.3 à l'aide de la Formule (A.2):

$$\alpha = \text{Im} \left[-\frac{j}{\Delta s} \ln \frac{E_{10} + E_{12} - \sqrt{-4E_{11}^2 + (E_{10} + E_{12})^2}}{2E_{11}} \right] \quad (\text{A.2})$$

où Δs est la distance entre les emplacements des composantes enregistrées (1,778 mm).

Pour la méthode FDTD, tous les résultats doivent être évalués et indiqués pour l'axe du guide d'ondes orienté le long des trois axes du système de coordonnées, pour deux orientations différentes autour de l'axe du guide d'ondes (faire pivoter le guide d'ondes de 90°). α doit être évalué pour la propagation dans la direction de l'axe positif, uniquement.

Pour chaque configuration de guide d'ondes du Tableau A.4, l'écart maximal de la constante d'affaiblissement α par rapport à sa valeur de référence doit être évalué en fonction de la fréquence. Les valeurs de référence ont été dérivées conformément à la Formule (A.3):

$$\alpha = 8,686 \frac{1}{b\eta} \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}} \frac{\left[1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{f_c}{f} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f} \right)^2}} \quad [\text{dB/m}] \quad (\text{A.3})$$

où:

- ω est la fréquence angulaire;
- μ_0 est la perméabilité de l'espace libre;
- σ est la conductivité des parois du guide d'ondes;
- a est la largeur du guide d'ondes (également appelée w);
- b est la hauteur du guide d'ondes;
- η est l'impédance d'onde de l'élément diélectrique dans le guide d'ondes;
- f est la fréquence;
- f_c est la fréquence de coupure du guide d'ondes.

La constante 8,686 convertit les unités des résultats de calcul de l'affaiblissement linéique de Np en dB. Plus d'informations peuvent être obtenues dans [12]. Les solutions de référence du Tableau A.4 sont données dans un fichier distinct (Annexe I). Les écarts de α par rapport à ses résultats de référence doivent être inférieurs ou égaux aux tolérances indiquées dans le Tableau A.4.

Dimensions en millimètres

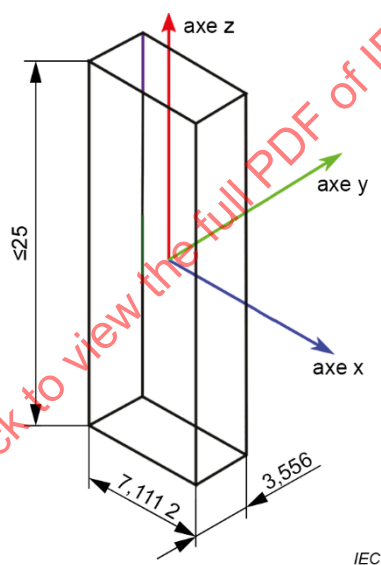


Figure A.2 – Guide d'ondes R320

Dimensions en millimètres

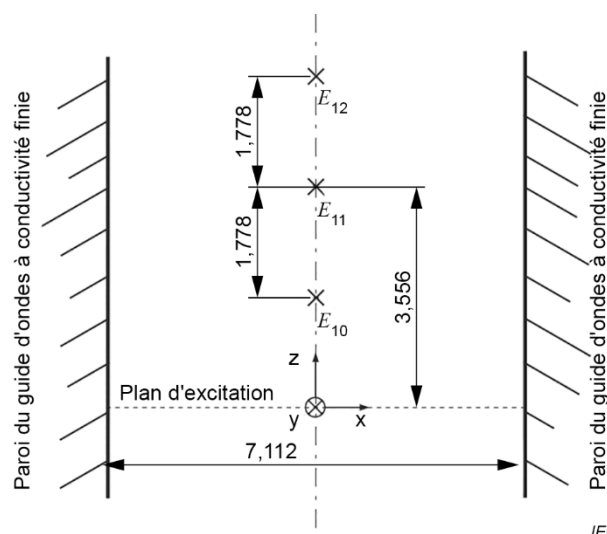


Figure A.3 – Section du guide d'ondes R320 qui indique les emplacements des composantes E_v à enregistrer

Tableau A.3 – Pas de maillage fin et grossier minimal pour la méthode utilisée

Méthode	Maillage fin	Maillage grossier
FDTD	0,088 9 mm	0,355 6 mm
FEM, ordre inférieur	0,1 mm	0,3 mm
FEM, deuxième ordre inférieur	0,2 mm	0,5 mm
FEM, troisième ordre inférieur	0,5 mm	1,0 mm

Tableau A.4 – Résultats de l'évaluation des caractéristiques de dispersion calculée

Configuration du guide d'ondes	Limite de conformité du code						
Axe du guide d'ondes (direction de propagation) et orientation autour de l'axe du guide d'ondes (FDTD uniquement)	x						
ε_r		1	2	1	2	1	2
σ [S/m]		10^5	10^5	10^6	10^6	10^7	10^7
écart maximal de la constante α calculée par rapport au maillage fin de référence	$\pm 10 \%$						
écart maximal de la constante α calculée par rapport au maillage grossier de référence	$\pm 15 \%$						
L'écart maximal de l'évaluation par calcul doit être évalué sur l'ensemble de la plage de fréquences calculée (25 GHz à 40 GHz).							