

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Fibre optic communication subsystem test procedures –
Part 4-4: Cable plants and links – Polarization mode dispersion measurement for
installed links**

**Procédures d'essai des sous-systèmes de télécommunication fibroniques –
Partie 4-4: Installations de câbles et liaisons – Mesure de la dispersion de mode
de polarisation pour les liaisons installées**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2017 IEC, Geneva, Switzerland

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 from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
info@iec.ch
www.iec.ch

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 000 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

67 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

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.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 000 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

67 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Fibre optic communication subsystem test procedures –
Part 4-4: Cable plants and links – Polarization mode dispersion measurement for
installed links**

**Procédures d'essai des sous-systèmes de télécommunication fibroniques –
Partie 4-4: Installations de câbles et liaisons – Mesure de la dispersion de mode
de polarisation pour les liaisons installées**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 33.180.01

ISBN 978-2-8322-8821-4

**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.....	7
INTRODUCTION.....	9
1 Scope.....	10
2 Normative references	10
3 Terms, definitions, symbols and abbreviated terms.....	10
3.1 Terms and definitions.....	10
3.2 Symbols and abbreviated terms	11
4 Background on PMD properties	12
5 Measurement methods	13
5.1 Methods of measuring PMD	13
5.1.1 General	13
5.1.2 Method A: Fixed analyzer with Fourier transformation (FA-FT)	14
5.1.3 Method B: Stokes parameters evaluation (SPE).....	14
5.1.4 Method C: Interferometric	15
5.1.5 Method D: Stokes parameter evaluation using back-reflected light.....	15
5.1.6 Method E: Modulated phase-shift technique.....	15
5.1.7 Method F: Polarization phase shift (PPS).....	15
5.1.8 Method G: Wavelength scanning OTDR and SOP Analysis (WSOSA).....	16
5.2 Document structure.....	16
5.3 Reference test method	16
6 Measurement configurations.....	16
6.1 Passive cabling link	16
6.2 Link including amplifiers.....	17
6.3 Link including chromatic dispersion compensating modules	17
6.3.1 General	17
6.3.2 Grating based DCM	17
6.4 Link including ROADMs	17
6.4.1 General	17
6.4.2 Multi-channel point to point configuration.....	18
6.4.3 Single channel configuration.....	18
7 Measurement considerations	18
7.1 General.....	18
7.2 Wavelength range	18
7.3 PMD measurement range.....	18
7.4 Measurement dynamic range	19
7.5 Fibre movement.....	19
7.6 Input and output SOP scrambling.....	19
7.6.1 General	19
7.6.2 Polarizers/scramblers	19
7.6.3 The 9-states Mueller set	20
7.6.4 Random scrambling	20
7.7 Polarization dependent loss	20
7.8 Amplifier considerations.....	20
7.8.1 General	20
7.8.2 Optical isolators.....	20
7.8.3 Wavelength range.....	20

7.8.4	Power levels	20
7.8.5	Amplified spontaneous emission (ASE) noise	20
7.9	Considerations on location of equipment	21
8	Apparatus	21
8.1	General	21
8.2	Light source and polarizers	21
8.3	Input optics	22
8.4	Cladding mode stripper	22
8.5	High-order mode filter	22
8.6	Output connection	22
8.7	Output optics	22
8.8	Detector	23
8.9	Computer or test platform	23
8.10	Means to reduce the effects of amplified spontaneous emission	23
9	Sampling and specimens	23
10	Procedure	23
11	Calculation or interpretation of results	24
12	Documentation	24
12.1	Information required for each measurement	24
12.2	Information to be available	24
13	Specification information	25
Annex A (normative)	Fixed analyzer method	26
A.1	Apparatus	26
A.1.1	Block diagrams	26
A.1.2	Light source	28
A.1.3	Analyzer	29
A.1.4	Optional polarization control at the input and output of the link under test	29
A.2	Procedure	29
A.2.1	Wavelength range and increment	29
A.2.2	Complete the scans	30
A.3	Calculations – Fourier transform	31
A.3.1	General	31
A.3.2	Data pre-processing and Fourier transformation	32
A.3.3	Transform data fitting	32
A.3.4	Spectral range	35
Annex B (normative)	Stokes parameter evaluation method	36
B.1	Apparatus	36
B.1.1	Block diagrams	36
B.1.2	Light source	37
B.1.3	Polarimeter	37
B.2	Procedure	37
B.3	Calculations	38
B.3.1	General	38
B.3.2	Jones matrix eigenanalysis (JME)	38
B.3.3	Poincaré sphere analysis (PSA) DGD calculation	40
Annex C (normative)	Interferometric method	41
C.1	General	41

C.2	Traditional analysis (TINTY).....	42
C.2.1	Apparatus.....	42
C.2.2	Procedure.....	43
C.2.3	Calculations.....	44
C.3	General analysis (GINTY).....	45
C.3.1	Benefit.....	45
C.3.2	Apparatus.....	45
C.3.3	Procedure.....	46
C.3.4	Calculations.....	47
Annex D (informative)	Stokes parameter evaluation method using back-reflected light.....	49
D.1	Utility.....	49
D.2	Apparatus.....	49
D.2.1	Block diagram.....	49
D.2.2	Directional coupler.....	49
D.2.3	Angled connector.....	49
D.2.4	Far-end termination.....	49
D.3	Procedure.....	50
D.4	Calculation and interpretation of results.....	50
Annex E (informative)	Modulation phase-shift method.....	51
E.1	Apparatus.....	51
E.1.1	Overview and block diagrams.....	51
E.1.2	Light source(s).....	52
E.1.3	Modulation.....	53
E.1.4	Polarization control.....	54
E.1.5	Input and output optics.....	54
E.1.6	Optical detector and phase detection electronics.....	54
E.1.7	Reference signal.....	55
E.2	Procedure.....	55
E.2.1	Modulation frequency.....	55
E.2.2	Scan the wavelengths and measure DGD.....	55
E.2.3	Calibration.....	58
E.3	Calculations.....	58
E.3.1	DGD calculations.....	58
E.3.2	PMD calculation.....	60
Annex F (informative)	Polarization phase shift method.....	61
F.1	Apparatus.....	61
F.1.1	Block diagram.....	61
F.1.2	Light source.....	61
F.1.3	Modulation.....	61
F.1.4	Polarization control.....	62
F.1.5	Output optics.....	62
F.1.6	Optical detectors.....	62
F.1.7	Amplitude and phase comparator.....	62
F.1.8	Reference signal.....	63
F.2	Procedure.....	63
F.2.1	Modulation frequency.....	63
F.2.2	Wavelength increment.....	63
F.2.3	Scanning wavelengths and measuring DGDs.....	63
F.2.4	Calibration.....	64

F.3	Calculations	64
F.3.1	Results overview	64
F.3.2	DGD determination	65
F.3.3	PMD calculation.....	66
Annex G (normative) Wavelength scanning OTDR and SOP analysis (WSOSA) PMD test method.....		67
G.1	General.....	67
G.2	Apparatus	67
G.2.1	Block diagram.....	67
G.2.2	Light source.....	68
G.2.3	Launch polarization	68
G.2.4	Polarization scrambling.....	69
G.2.5	Input/output optics	69
G.3	Specimen stability.....	69
G.4	Procedure	69
G.4.1	Set instrument parameters.....	69
G.4.2	Action of the instrument after measurement initiation.....	70
G.5	Calculations	72
G.5.1	Power normalisation	72
G.5.2	Transmission differences	73
G.5.3	Mean-square transmission difference and round trip PMD	74
G.5.4	Determination of PMD.....	75
G.6	Procedures for measuring PMD on installed aerial links	75
G.6.1	Instability compensation	75
G.6.2	Approaches to reducing the effects of instabilities	76
Annex H (informative) PMD determination by Method C		78
H.1	General.....	78
H.2	Traditional analysis.....	78
H.3	General analysis	80
Bibliography.....		82
Figure 1 – Typical passive cabling link configuration		16
Figure 2 – Example configuration of link including amplifiers.....		17
Figure A.1 – Block diagrams for fixed analyzer		28
Figure A.2 – Example of the R-function for the fixed analyzer method.....		31
Figure A.3 – A chirped sine wave.....		33
Figure A.4 – PMD by Fourier analysis		34
Figure B.1 – Block diagram for Method B using a narrowband (tuneable laser) source.....		36
Figure B.2 – Block diagram for Method B using a broadband (ASE) source.....		36
Figure C.1 – Generic set-up for Method C (INTY).....		41
Figure C.2 – Schematic diagram for Method C (TINTY).....		42
Figure C.3 – Typical data obtained by Method C (TINTY).....		44
Figure C.4 – Schematic diagram for Method C (GINTY)		45
Figure C.5 – Typical random-mode-coupling data obtained by Method C (GINTY)		47
Figure C.6 – Typical mixed-mode-coupling data obtained by Method C (GINTY)		47
Figure D.1 – Layout for Method D		49
Figure E.1 – Basic apparatus		51

Figure E.2 – Apparatus layout for polarization modulation.....	52
Figure E.3 – Mueller states on Poincaré sphere	57
Figure E.4 – DGD versus wavelength.....	58
Figure E.5 – DGD in histogram format	59
Figure F.1 – Block diagram for Method F (polarization phase shift method).....	61
Figure F.2 – DGD versus wavelength for a random mode coupling device	65
Figure G.1 – Illustration of the frequency domain and parameters for WSOSA.....	67
Figure G.2 – Typical generic experimental implementation for WSOSA.....	68
Figure G.3 – Typical power measurement results.....	72
Figure G.4 – Typical $s(\omega)$ for random I/O-SOP	73
Figure G.5 – Typical transmission difference for a frequency pair and I/O-SOP	74
Figure G.6 – Example of 2-pulse implementation in presence of instabilities.....	77
Table E.1 – Example of Mueller set.....	57

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61280-4-4:2017

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**FIBRE OPTIC COMMUNICATION SUBSYSTEM
TEST PROCEDURES –****Part 4-4: Cable plants and links – Polarization mode dispersion
measurement for installed links**

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 Publication(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. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements 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.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC 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 transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is 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 its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees 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 Publication or any other IEC 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 some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61280-4-4 has been prepared by subcommittee 86C: Fibre optic systems and active devices, of IEC technical committee 86: Fibre optics.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 2006. This second edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- a) theory is removed and replaced with a reference to IEC TR 61282-9;
- b) a new method, wavelength scanning OTDR and SOP analysis (WSOSA), is added as Annex G;
- c) a brief description of each method is added to Clause 5;
- d) Methods E and F are converted to informative Annexes E and F;
- e) a new Clause (6) on measurement configurations is added;

- f) a new Clause (7) on measurement considerations is added;
- g) Clause 10 on procedure is expanded;
- h) several of the apparatus diagrams are improved;
- i) several clarifications about what is measured and what is calculated have been made in Annex H.

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

CDV	Report on voting
86C/1378/CDV	86C/1419/RVC

Full information on the voting for the approval of this International Standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

This document has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

A list of all parts in the IEC 61280 series, published under the general title *Fibre optic communication subsystem test procedures*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under "<http://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 publication 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

Polarization mode dispersion (PMD) is a statistical parameter. The reproducibility of measurements depends on the particular method, but is limited also by the PMD level of the link and the accessible wavelength range. Gisin [1]¹ derived a theoretical limit to this reproducibility independent of the measurement method by assuming ideal measurement conditions.

Originally, the principles of IEC 61280-4-4:2006 were closely aligned with those of IEC 60793-1-48:2003 on optical fibre and optical fibre cable test method, which focuses on aspects related to the measurement of factory lengths. However, IEC 60793-1-48:2007 removed some of the test methods that are no longer of interest to fibre and cable manufacturers. These have been retained as informative Annexes D, E, and F in this document, and a new test method G has been added.

This document also updates test methods A, B and C and adds more information applicable to testing of installed cabling.

NOTE 1 Test methods for factory lengths of optical fibres and optical fibre cables are given in IEC 60793-1-48.

NOTE 2 Test methods for optical amplifiers (OAs) are given in IEC 61290-11-1 and IEC 61290-11-2.

NOTE 3 Test methods for passive optical components are given in IEC 61300-3-32.

NOTE 4 Guidelines for the calculation of PMD for links that include components such as dispersion compensators or optical amplifiers are given in IEC TR 61282-3.

NOTE 5 Further general guidance on PMD measurements and background theory is contained in IEC TR 61282-9.

¹ Figures in square brackets refer to the Bibliography.

FIBRE OPTIC COMMUNICATION SUBSYSTEM TEST PROCEDURES –

Part 4-4: Cable plants and links – Polarization mode dispersion measurement for installed links

1 Scope

This part of IEC 61280 provides uniform methods of measuring polarization mode dispersion (PMD) of single-mode installed links. An installed link is the optical path between transmitter and receiver, or a portion of that optical path. These measurements can be used to assess the suitability of a given link for high bit rate applications, or to provide insight on the relationships of various related transmission attributes. This document focuses on the measurement methods and requirements for measuring long lengths of installed cabling that can also include other optical elements, such as splices, connectors, amplifiers, chromatic dispersion compensating modules, dense wavelength division multiplexing or multiplexer (DWDM) components, multiplexers, wavelength selective switches, re-configurable optical add drop multiplexer (ROADMS).

This document focuses on the apparatus, procedures, and calculations needed to complete measurements. IEC TR 61282-9 explains the theory behind the test methods.

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 60793-1-44, *Optical fibres – Part 1-44: Measurement methods and test procedures – Cut-off wavelength*

IEC 61300-3-35, *Fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures – Part 3-35: Examinations and measurements – Visual inspection of fibre optic connectors and fibre-stub transceivers*

IEC TR 61282-9, *Fibre optic communication system design guides – Part 9: Guidance on polarization mode dispersion measurements and theory*

IEC TR 62627-01, *Fibre optic interconnecting devices and passive components – Part 01: Fibre optic connector cleaning methods*

3 Terms, definitions, symbols and abbreviated terms

3.1 Terms and definitions

No terms and definitions are listed in this document.

ISO and IEC 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>

3.2 Symbols and abbreviated terms

c	velocity of light in vacuum (299792458 m/s)
h	coupling length (also called h -parameter)
L	length of the link
t_c	optical source coherence time (Method C)
$\delta\lambda$	wavelength increment (interval, spacing or step size)
$\delta\nu$	optical frequency increment (interval, spacing or step size)
$\Delta\lambda$	optical source spectral width or linewidth (FWHM unless noted otherwise)
$\Delta\theta$	rotation angle on the Poincaré sphere
$\delta\tau$	differential arrival times of different polarization components
$\delta\tau_{\max}$	maximum measurable $\delta\tau$
$\delta\tau_{\min}$	minimum $\delta\tau$ value that can be measured
$\Delta\tau$	differential group delay value
$\langle\Delta\tau\rangle$	average DGD over a wavelength range or PMD_{average} value
$\langle\Delta\tau^2\rangle^{1/2}$	RMS DGD over a wavelength range or PMD_{RMS} value
$\Delta\tau_{\max}$	maximum $\Delta\tau$ value that can be measured
$\Delta\omega$	angular frequency variation in Method B
λ	test wavelength used to measure PMD
λ_0	central wavelength of the light source
ν	optical light frequency
σ_R	second moment of Fourier transform data
σ_0	RMS width of the squared autocorrelation envelope
σ_x	RMS width of the squared cross-correlation envelope
σ_ε	RMS width of interferogram
ω	angular optical frequency
ASE	amplified spontaneous emission
DCF	(chromatic) dispersion compensating fibre
DCM	(chromatic) dispersion compensating module
DGD	differential group delay
DOP	degree of polarization
DUT	device under test
DWDM	dense wavelength division multiplexing or multiplexer
FA	fixed analyzer
FA-FT	fixed analyzer-Fourier transform (PMD test method)
FBG	fibre Bragg grating
FET	field effect transistor
FWHM	full-width half-maximum
GINTY	general interferometric analysis (PMD test method)
INTY	interferometry (PMD test method)
I/O-SOP	input-output state of polarization
JME	Jones matrix eigenanalysis (PMD test method)

LED	light emitting diode
NLE	non-linear effect
OA	optical amplifier
OSA	optical spectrum analyzer
PDL	polarization dependent loss
PIN (diode)	positive intrinsic negative (diode layers)
PMD	polarization mode dispersion
PPS	polarization phase shift
PSA	Poincaré sphere analysis
PSP	principal SOP
RBW	resolution bandwidth
RMC	random mode coupling
RMS	root mean-square
ROADM	re-configurable optical add drop multiplexer
RTM	reference test method
SMF	single-mode fibre
SOP	state of polarization
SPE	Stokes parameter evaluation (PMD test method)
TINTY	traditional interferometric analysis (PMD test method)
WSOSA	wavelength scanning OTDR and SOP analysis (PMD test method)
WSS	wavelength selective switch

4 Background on PMD properties

PMD causes an optical pulse to spread in the time domain. This dispersion could impair the performance of a telecommunications system. The effect can be related to differential phase and group velocities and corresponding arrival times, $\delta\tau$, of different polarization components of the signal. For a sufficiently narrow band source, the effect can be related to a differential group delay (DGD), $\Delta\tau$, between pairs of orthogonally polarized principal states of polarization (PSP) at a given wavelength. For broadband transmission, the delays bifurcate and result in an output pulse that is spread out in the time domain. In this case, the spreading can be related to the root-mean square (RMS) of DGD values.

In long fibre spans, DGD varies randomly both in time and wavelength since it depends on the details of the birefringence along the entire fibre length. It is also sensitive to time-dependent temperature and mechanical perturbations on the fibre. For this reason, a useful way to characterize PMD in long fibres is in terms of an average DGD value over an appropriately large optical frequency range, either RMS $\langle\Delta\tau^2\rangle^{1/2}$, the RMS DGD over this frequency range, or MEAN $\langle\Delta\tau\rangle$, the (linear) mean of the DGD over this same frequency range. In principle, the average DGD value (RMS $\langle\Delta\tau^2\rangle^{1/2}$ or MEAN $\langle\Delta\tau\rangle$) does not undergo large changes for a given fibre from day to day or from source to source, unlike the parameters $\delta\tau$ or $\Delta\tau$. In addition, the average DGD value is a useful predictor of transmission performance.

The term PMD is used both in the general sense of two polarization modes having different group velocities (one having the fastest velocity and corresponding earliest arrival time and the other the slowest velocity and corresponding latest arrival time, the difference between the two arrival times being the DGD), and in the specific sense of the average DGD value (RMS $\langle\Delta\tau^2\rangle^{1/2}$ or MEAN $\langle\Delta\tau\rangle$). The latter gives us the strict definition of PMD for the purposes of this document. Although the DGD $\Delta\tau$ or pulse broadening $\Delta\delta$ is preferably averaged over frequency, for certain situations it can be averaged over time, or temperature. There are two metrics of averaged DGD, that is PMD:

$$PMD_{\text{MEAN}} = \langle \Delta\tau \rangle \quad (1)$$

$$PMD_{\text{RMS}} = \langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2} \quad (2)$$

The expression in Equation (1) is the PMD definition in term of the linear average of the DGD values. The expression in Equation (2) is the PMD definition in term of RMS average of the DGD values.

For many links, the DGD values are randomly distributed closely as a Maxwell distribution. Under the assumption of a perfect fit with a Maxwell distribution, the linkage between the two metrics, linear average DGD and RMS DGD is given by Equation (3).

$$\langle \Delta\tau \rangle = \left(\frac{8}{3\pi} \right)^{1/2} \langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2} \quad (3)$$

NOTE Equation (3) applies if the distribution of DGD values is Maxwellian. This assumption may not be valid if there are highly birefringent elements (relative to the rest of the link) in the optical path. A multiplier of 3 to 3,7 (see IEC TR 61282-3), depending on probability limits accepted by the link owner, is applied to the PMD_{AVG} value to determine the maximum DGD, which is specified for ITU-T compliant links. This multiplier is based on a Maxwell assumption and reflects a very long tail of that distribution. If the link includes a highly birefringent element, both the PMD_{AVG} and PMD_{RMS} metrics will increase relative to the actual tail of the DGD distribution (implying that a reduced multiplier could be used), but Equation (3) will not be maintained because the DGD distribution will begin to resemble one based on the square root of a non-central chi-square distribution with three degrees of freedom. In these cases, the PMD_{RMS} value will generally be larger relative to the PMD_{AVG} value indicated by Equation (3). This condition is indicated by “flat tops” on the fringe envelopes from the time domain measurement methods such as Method C and by bimodal DGD distributions from the frequency domain measurement methods such as Method B.

The expected value operator in the above equations refers to the long term expected value across all wavelengths. In practice, a finite wavelength range at a particular point of time and condition are sampled and some form of mean of the data is calculated. The expected value of these calculated means is equal to the long-term expected values, assuming ergodicity over time, wavelength, and condition. If this assumption is not valid, the result will vary depending on the particular wavelengths that are sampled. For ergodic conditions, the reproducibility of the measurement will vary with wavelength range and PMD level [1].

NOTE Ergodic: of or relating to a process in which every sequence or sizable sample is equally representative of the whole.

5 Measurement methods

5.1 Methods of measuring PMD

5.1.1 General

Seven basic methods of measuring PMD are given. Details specific to Methods A, B, C and G are given in normative annexes. Details specific to Methods D, E, and F are given in informative annexes. Methods A, B, C and G are in widespread commercial use and have been implemented in field test equipment. Methods A, B and C are also applicable to testing of fibres and cables in a factory environment as detailed in IEC 60793-1-48:2007. For some methods, multiple approaches of analyzing the measured results are also provided.

- Method A Fixed analyzer (FA)
 - Fourier transform (FT)
- Method B Stokes parameter evaluation (SPE)
 - Jones matrix eigenanalysis (JME)
 - Poincaré sphere analysis (PSA)

- Method C Interferometry (INTY)
 - Traditional analysis (TINTY)
 - General analysis (GINTY)
- Method D Stokes parameter evaluation using back-reflected light
 - Jones matrix eigenanalysis (JME)
 - Poincaré sphere analysis (PSA)
- Method E Modulated phase-shift
 - Full search
 - Mueller set analysis
- Method F Polarization phase shift (PPS)
- Method G Wavelength scanning OTDR and SOP analysis (WSOSA)
 - DGD analysis
 - PMD analysis

Each method has advantages in certain respects and disadvantages in others. These are discussed in more detail in Clause 7.

5.1.2 Method A: Fixed analyzer with Fourier transformation (FA-FT)

Method A requires only one input SOP from a broadband source or a tuneable laser source, depending upon the implementation. A fixed analyzer is used to track the relative change in power of one element of the Stokes vectors as a function of wavelength. When a Fourier transform is applied to this data, the result is a virtual half-interferogram, which is evaluated in a manner similar to Method C (TINTY).

5.1.3 Method B: Stokes parameters evaluation (SPE)

Method B measures $\Delta\tau(\omega)$ by measuring a polarimetric response to a change of narrowband light across a wavelength range. For each wavelength, three known and distinct SOPs such as for example linear SOPs at nominally 0° , 45° and 90° (orthogonal on the Poincaré sphere) shall be launched and the output Stokes vector that is transmitted through the link is measured.

The change of these Stokes vectors with angular optical frequency (wavelength), ω , and, with change in input SOP, yields the DGD as a function of wavelength through relationships that are based on the following definitions:

$$\frac{d\hat{s}(\omega)}{d\omega} = \hat{\Omega}(\omega) \times \hat{s}(\omega) \quad (4)$$

$$\Delta\tau(\omega) = |\hat{\Omega}(\omega)| \quad (5)$$

where

$\hat{s}$ is the output Stokes vector at angular optical frequency ω ;

$\hat{\Omega}$ is the PSP vector, also called polarization dispersion vector (PDV) at angular optical frequency ω ;

$\Delta\tau$ is the DGD at angular optical frequency ω .

The JME is completed by transforming the output Stokes vectors to Jones matrices [2], appropriate combination of the matrices at adjacent wavelengths, and calculation of the eigenvalues of the result followed by the application of an argument formula to obtain the DGD at the base frequency.

The PSA is completed by doing matrix algebra on the normalized output Stokes vectors to infer the output Stokes vector associated with circular birefringence at adjacent wavelengths, followed by the application of an arcsine formula to obtain the DGD at the base frequency.

For both JME and PSA, the average of the DGD values for a given wavelength range yields the PMD value for that range. The JME and PSA are mathematically equivalent. When using a narrowband source, the usual care should be taken to minimize optical reflections that could give rise to coherent interference effects.

In addition, in the case of a start-stop-measure system (by opposition to a swept system), the step size of the narrowband source shall be carefully selected in accordance with the expected DGD spectrum (DGD variation as a function of wavelength). More detail on step-size selection is given in Clause B.2. The linewidth of the narrowband source shall then be adjusted to the selected step size in accordance with the Nyquist criterion.

5.1.4 Method C: Interferometric

Method C is based on a broadband light source that is polarized at one or more known and distinct SOPs. The cross-correlation of the emerging electromagnetic field is determined by the interference pattern of the output light. The characterization of this pattern is done by computing the RMS width of the cross-correlation envelope of the interferogram for TINTY or the squared RMS widths of both the cross-correlation and autocorrelation envelopes of the interferogram for GINTY. These RMS widths yield the PMD value for the wavelength range associated with the source spectrum (the source bandwidth). Method C measures the PMD_{RMS} value only.

5.1.5 Method D: Stokes parameter evaluation using back-reflected light

Method D is in principle the same as Method B, but the output Stokes vectors that are reflected from the end of the link back to the source are measured to obtain DGD values. A modified formula that takes the reflection into account is used to calculate the PMD value for a given band. Since the reflection is required, the method is not suitable for links containing isolators (often found in optical amplifiers). Care should also be taken as in all other cases where a narrowband light source is used in order to avoid coherence interference effects and Fabry-Perot etalon effects that could show as false DGD. These effects produce delays that will be recorded in any case. Results reported from literature [12] have demonstrated that Method D is limited to distances of the order of 40 km, except if a reflector is used at the end of the plant to enhance the reflected light intensity.

5.1.6 Method E: Modulated phase-shift technique

Method E measures the phase difference between two or more input SOPs for a modulated narrowband light source. The full search technique requires launching an alternating pair of orthogonal input SOPs to obtain a given phase shift. The axis of this pair is varied across the entire Poincaré sphere to obtain the maximum phase shift. The maximum phase shift difference that is found is used to deduce the DGD at the centre wavelength of the source spectrum. The Mueller set technique [3] requires launching four SOPs per wavelength (source spectrum), representing a Mueller set. Analysis of the phase shifts associated with these SOPs yields a DGD value for the wavelength. When the measurement is conducted for a number of wavelengths in a wavelength range, the average of the DGD values yields the PMD value for that range.

5.1.7 Method F: Polarization phase shift (PPS)

Method F measures the phase differences between different known and distinct SOPs such as linear and orthogonal input SOPs – similar to Method E. It is different from Method E in that only two orthogonal input SOPs are required. However, because of this, results at two wavelengths are required to calculate one DGD value.

5.1.8 Method G: Wavelength scanning OTDR and SOP Analysis (WSOSA)

Method G uses an OTDR with a tuneable laser to launch two pulses of light at closely spaced wavelengths through a polarization scrambler into the link under test. The reflected pulses of light from the far end of the link under test pass through the polarization scrambler on their way back into the OTDR and a polarising beam splitter is used to direct the different polarization components to a pair of detectors. The difference between the signal levels at the two detectors is measured, and this difference is compared between the two wavelengths. This process can be repeated for many different input/output SOPs at each wavelength pair and at many different wavelength pairs to evaluate the PMD over a representative wavelength range.

5.2 Document structure

Information common to all seven methods is contained in Clauses 1 through 13, and requirements pertaining to each individual method appear in Annexes A, B, C, D, E, F and G, respectively.

5.3 Reference test method

There is no reference test method (RTM) because each method has its own particular optimal applications.

6 Measurement configurations

6.1 Passive cabling link

The link to be tested typically ranges from 10 km to 160 km, with most spans on a long haul network being typically no more than 80 km long, and with a loss less than 22 dB at 1 550 nm. These spans will normally be made up of many drums of cable, each 2 km to 10 km in length, spliced together end-to-end (see Figure 1).



Figure 1 – Typical passive cabling link configuration

This means that the link can be considered to have "random mode coupling" (RMC). It is also likely that fibres installed after the year 2000 (and many before that) will be "spun" to introduce additional mode coupling.

Normally, the fibres would be terminated at patch panels by splicing on pigtails to provide connector interfaces at optical distribution frames (ODFs) within buildings.

All test methods can be used successfully on this type of measurement configuration, provided that the implementation has sufficient dynamic range and that the PMD falls within the measurement range of the system. Typically, the total PMD of a link would lie between 0,1 ps (e.g., 10 km at 0,03 ps/√km) and 12 ps (e.g., 160 km at 1 ps/√km).

6.2 Link including amplifiers

A DWDM system can be operational over a link that includes amplifiers (see Figure 2). If the system is to be upgraded to operate at a higher data rate, for example, then the PMD of the entire link including the amplifiers might need to be tested.

Such a link will typically range between 100 km and 2 000 km for terrestrial systems and can extend up to 6 500 km for trans-Atlantic and 13 000 km for trans-Pacific undersea cables.

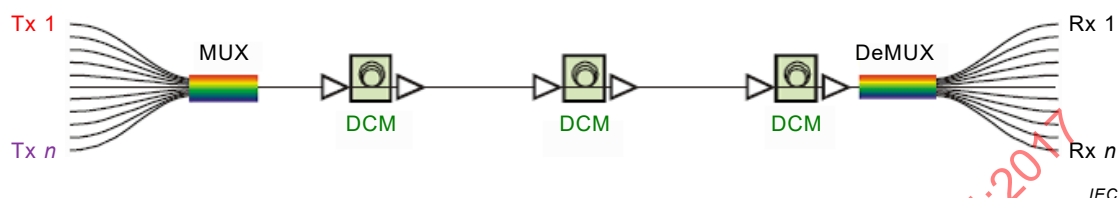


Figure 2 – Example configuration of link including amplifiers

With the exception of Methods D and G, all methods in this document can be used to measure the PMD in the gain band of links that include pumped optical amplifiers. Methods D and G rely on reflections coming back from the far end of the link under test. Amplifiers usually incorporate optical isolators that block any light travelling in the reverse direction.

6.3 Link including chromatic dispersion compensating modules

6.3.1 General

As shown in Figure 2, it is likely that a long haul link that contains amplifiers will also contain (chromatic) dispersion compensating modules.

A fibre based DCM will typically contain a long length (many kilometres) of dispersion compensating fibre (DCF) that has strongly negative chromatic dispersion to counteract the positive chromatic dispersion of a span of typical transmission fibre. This DCM can introduce significant amounts of PMD and therefore should be included in the measurement configuration.

Any of the test methods that can be used on amplified links can also be used on links that contain fibre based DCMs.

6.3.2 Grating based DCM

Increasingly, DCMs that use chirped fibre Bragg gratings are being used instead of fibre based DCMs. The applicability of the test methods to links that contain FBGs is for further study.

6.4 Link including ROADMs

6.4.1 General

Many networks are now built with re-configurable optical add drop multiplexers (ROADMs). These are network elements that allow the routing of different wavelengths in a DWDM system to different destinations whilst remaining in the optical domain. ROADMs are typically complex devices that include many functional elements, including amplifiers and wavelength selective switches (WSS), which result in tight optical filtering around the operational wavelengths. The presence of these elements can restrict the choice of test method. For example, the presence of amplifiers prevents the use of Methods D and G. The TINTY part of Method C requires a continuous spectrum and so cannot be used due to the filtering.

However, it may be possible to measure PMD and/or DGD in the following measurement configurations.

6.4.2 Multi-channel point to point configuration

If the ROADMs are set to carry multiple wavelengths between two locations, then Method A and the GINTY part of Method C can be used within the passbands of a set of wavelengths, and Method B can be used by setting a tuneable laser source to the DWDM wavelengths for which the ROADM is designed.

6.4.3 Single channel configuration

Depending upon the ROADM configuration, it may be possible to measure the DGD within the passband of a single channel, for example using either Method B or Method E.

7 Measurement considerations

7.1 General

When conducting PMD measurements on installed cabling, there are a number of considerations that can affect the choice of measurement technique and the accuracy of the results obtained. Clause 7 outlines some of these issues and their impact on the measurement. IEC TR 61282-9 shall be used to provide complete descriptions of the issues impacting the choice of measurement methods.

7.2 Wavelength range

In general, the broader the wavelength range of the measurement, the more accurate the result will be – known as the Gisin uncertainty [1].

Method E can yield DGD results for the narrowest occupied optical bandwidth of all the methods, but it requires the DGD of the link to be in excess of around 0,5 ps. The bandwidth requirement of Methods B, D and F is larger than that of Method E because numerical differentiation of the output data collected at two closely separated wavelengths is required, but these methods can measure DGD at the lowest of levels. Method A or Method C does not provide measurements of individual DGD values but does provide the RMS DGD (PMD_{RMS}) over the wavelengths of the source spectrum.

Method F is similar to Method E when Method E is implemented with the Mueller matrix approach. Method F, however, requires measurements at two adjacent wavelengths to obtain one DGD value, similar to Methods B and D.

7.3 PMD measurement range

Some of the test methods have limits on the upper or lower bound of the amount of PMD that they are capable of measuring, depending upon the particular implementation. For example, consider the following.

- The minimum PMD that can be measured using Method A is determined by the spectral range of the measurement to typically 0,1 ps, unless a DGD offset is used to remove this limitation.
- The maximum PMD that can be measured using Method A is determined by the spectral resolution of the detection system. If a high resolution spectrum analyzer is used, this limit can be 80 ps or more.
- The minimum PMD that be measured using Method C (TINTY) is determined by the spectral width of the source being used. The broader the source, the lower the PMD that can be measured. Typical limits are around 0,1 ps.
- The maximum PMD that can be measured using Method C is limited by the range of mirror movement in the interferometer. Typical limits are 100 s of ps.

7.4 Measurement dynamic range

It is necessary to ensure that the measurement system is capable of measuring over the expected loss of the link configuration. Single ended measurement techniques (D and G) that rely on a reflected signal from the far end of the link are particularly likely to suffer from a poor dynamic range. The performance of these systems can be improved by attaching a reflective termination to the far end of the link under test.

Where a broadband light source is used, it should have sufficient spectral power density for the measurement to be carried out.

Some measurement techniques (e.g., Method C) can have reduced dynamic range in the presence of larger amounts of PMD.

7.5 Fibre movement

Methods A, B, D, E, F and G may rely on measurements that can be disrupted if the link is vibrating, such as in the case of aerial cables, if the optical properties of the fibre change within the time used to measure the data for calculating individual DGD values. Fast measurement rates have been implemented in some commercial field test systems to reduce this effect. Methods A, B and G were demonstrated to give satisfactory performance in a field trial on a variety of installation environments [4], [5]. The data from this trial on the rate of change of the SOP showed that even underground cables could be subject to sudden transients in the SOP, and there were many environmental factors that could cause a change in the SOP, including vibration induced by the 50Hz of AC current on fibres attached to power line routes [6].

Method C can be used in the case of fibre movement, because it uses a broadband source and interferometry to deduce the PMD from the time-domain cross-correlation envelope of the measured interferogram.

7.6 Input and output SOP scrambling

7.6.1 General

The statistical basis of some of the PMD test methods (Methods A, C and G) can be improved by carrying out repeated measurements with a change in the input (and/or the output) state of polarization between measurements. This can help improve measurement certainty, particularly for low levels of PMD.

7.6.2 Polarizers/scramblers

Physically, SOP-scrambling consists of inserting controllable polarizers, one at the input and one at the output of the DUT, such that different input-SOPs and analyzer axes are set for a measurement scan. Multiple input/output SOPs can be selected to obtain a more complete set of measurements than would be possible for a single I/O-SOP setting. While a measurement obtained from a single setting is an option that would not require a scrambler, doing multiple settings will improve the precision of the result to a PMD value equal, for instance to the result from Method B. Multiple analyzer settings can also be used to obtain multiple settings (see C.2.1.3). Conceptually, the scrambling process can be viewed as follows:

- the input-polarizer followed by the scrambler acts as a single unit, an equivalent polarizer whose axis is set at any point on the Poincaré sphere in order to define the input-SOP;
- the scrambler followed by the analyzer acts as an equivalent analyzer whose axis is set at any point on the sphere in order to define the output-SOP.

One set of input-SOP/analyzer axis combinations will be labelled as one I/O-SOP. The aim is to get a set of measurements over uniformly distributed I/O-SOPs. In practice, there exists a number of possible ways to achieve this goal, as shown below.

7.6.3 The 9-states Mueller set

The sum of nine squared envelopes observed with nine specific I/O-SOPs is rigorously equal to the uniformly scrambled mean-squared envelope. These nine I/O-SOPs are three analyzer-axes forming a right-angled trihedron for each three input-SOPs also forming a right-angled trihedron.

7.6.4 Random scrambling

Random input/output SOP sampling has been implemented in various ways, including the following.

- Scan-to-scan scrambling: automatic/manual setting of the scramblers at each scan.
- Continuous scrambling: for some measurement methods including Method C, when squared envelopes are summed, scrambling can be performed while scanning. Automated scramblers are set to cover the sphere continuously as a function of time.
- Fast, single-scan scrambling: for some measurement methods including Method C, if scramblers are sufficiently fast, well-scrambled squared envelopes can be observed in a single-scan. However, this requires special provisions to avoid crosstalk between the AC part and the previously DC part of the interferogram.

7.7 Polarization dependent loss

None of the methods is suitable for measuring PMD of links with polarization dependent loss (PDL) in excess of 10 dB. Links with PDL values less than 1 dB can be measured with reasonable accuracy. Measurement accuracy can be compromised by the presence of PDL in excess of 1 dB.

7.8 Amplifier considerations

7.8.1 General

When the link to be tested includes optical amplifiers, there are several considerations; most of these relate to the presence of conventional Erbium-doped fibre amplifiers (EDFAs).

7.8.2 Optical isolators

Most amplifiers will incorporate optical isolators that block any light travelling in the reverse direction. This means that single ended test methods cannot be used.

7.8.3 Wavelength range

The amplifiers will only have a limited wavelength range of operation, commonly just the C-band (or sometimes the L-band). All measurements have to be made within this wavelength range. This can restrict some implementations of some of the test methods.

7.8.4 Power levels

It is important that the test signals are compatible with the intended operational power levels of the amplifiers in the link.

7.8.5 Amplified spontaneous emission (ASE) noise

When testing links including amplifiers, the amplified spontaneous emission (ASE) noise can generate depolarized spectral energy in the neighbourhood of the measurement wavelength. This will, in general, reduce the accuracy of the measurement. For Methods A, B, C, E and F, this effect can be moderated by implementing an optical or electrical filter at the receive end. However, optical filtering will not remove the ASE right under the signal spectrum. The accuracy will then be limited by a lower degree of polarization (DOP), if the spectral width of the filter cannot be sufficiently reduced as with a broadband source. Lower DOP can require the signal

to be integrated longer to be meaningful, or the result will become too noisy, and interpretation will be erroneous.

7.9 Considerations on location of equipment

Using Method A and C, the source and receive equipment will typically be located at opposite ends of the link, but there is no need for active coordination of the source and receive equipment during the course of a measurement.

Methods B, E and F require a communications link and coordination between the source and receive equipment during a measurement, requiring an additional communication channel. The link itself can also be used for this channel.

Using Methods D and G, all measurement equipment is co-located at one end of the link under test, but special care is needed at the remote end to ensure that a suitable reflection can be obtained; this can require a reflective termination to be attached to the remote end.

8 Apparatus

8.1 General

The following apparatus is common to all measurement methods. Annexes A, B, C, D, E, F and G include layout drawings and other equipment requirements for each of the seven methods, respectively.

All methods require light sources that are controlled at one or more known and distinct states of polarization (SOP). All methods require injecting light across a spectral region to obtain a PMD value that is characteristic of that region (for example, C-band, C+L bands, S+C+L bands).

The methods differ in

- spectral characteristics of the source,
- bandwidth characteristics of the detection system,
- physical characteristics that are actually measured, and
- analysis methods.

All the transmission elements of the apparatus can contribute to the measured PMD. It is essential that these elements be selected for their lowest maximum DGD and PDL in the same spectral range of the PMD measurement. It may be necessary to assess the overall contribution of these elements by performing a measurement on a short length (2 m) of low PMD fibre. When the PMD contribution of these elements is significant, one option is to subtract, in quadrature, the measurement system PMD value from the measured link PMD value before reporting a final value.

8.2 Light source and polarizers

See Annexes A, B, C, D, E, F and G for detailed options of the spectral characteristics of the light source. The source shall produce sufficient radiation at the intended wavelength(s) and be stable in intensity over a time period sufficient to perform the measurement and should cover the required range of wavelengths for PMD determination for the band of interest.

For all methods, the light source is required to be polarized at one or more known and distinct SOPs before it is injected into the link under test. Polarizers, polarization adjusters using waveplates, liquid crystal retardation plates, loops of birefringent fibre that are mechanically moved, or electro-optic crystal devices can be used to set the source SOP at the input of the link under test as well as the analyzer polarization axis at the output of the link under test. The performance of the polarization adjuster setup can be verified by measuring the output power

at three linear known and distinct SOPs. If the output powers are within 3 dB of one another, the adjuster setup is suitable.

For Methods A, B, D (when implemented using a narrowband tuneable light source – TLS), E, F and G, the effective spectral width (Gaussian spectrum, full-width half-maximum – FWHM) of the source, $\Delta\lambda$, shall be narrow enough so that light emerging from the link remains polarized under all conditions of measurement and for all DGD values being measured. A DOP of 90 % or greater is preferred, although measurements can be performed with values as low as 25 % with increased uncertainty. The relationship between DOP, the spectral width, $\Delta\lambda$, centre wavelength, λ_0 , and DGD, $\Delta\tau$, is given by:

$$DOP(\%) = 100 \exp \left[-\frac{1}{4 \ln(2)} \left(\frac{\pi c \Delta\tau \Delta\lambda}{\lambda_0^2} \right)^2 \right] \quad (6)$$

8.3 Input optics

A connectorized test cord can be employed to launch the light into the link. The rest of the input optics precedes this test cord. The connection shall be stable over the course of the measurement. If the measurement technique can be affected by a change in the SOP during the measurement, then the test cord may need to be secured so as to prevent movement.

For Methods D and G, there are special requirements on interface of measurement system test cord and the link to control reflections (see Annexes D and G).

8.4 Cladding mode stripper

Use a device that extracts cladding modes from the link fibre. Under most circumstances, the fibre coating will perform this function.

8.5 High-order mode filter

Use a means to remove high-order propagating modes in the desired wavelength range that is greater than or equal to the cut-off wavelength of the link. IEC 60793-1-44 defines the cut-off wavelength measurement of single-mode fibre. For example, a one-turn bend of radius of 30 mm on the fibre is generally sufficient.

8.6 Output connection

A connectorized test cord can be employed to connect the link to the output optics. This connection shall be stable over the course of the measurement. If the measurement technique can be affected by a change in the SOP during the measurement, then the test cord may need to be secured so as to prevent movement.

For Methods D and G, the light reflected from the far end of the link (relative to the light source) may require a special end preparation to maximize the reflection. For this method, the output of the connection is the same as the input connection.

8.7 Output optics

See the appropriate annex (A, B, C, D, E, F or G).

Some link measurements can require the use of the combination of an optical amplifier and variable attenuator in the test set-up to maintain power at a level that is suitable for the analyzer detector. In this case, such power adjustment apparatus is generally placed immediately before the detector.

For Methods D and G, the output optics are co-located with the input optics.

8.8 Detector

For signal detection, an optical detector is used which is linear and stable over the range of intensities, wavelengths and measurement times that are encountered in performing the measurement. A typical system can include synchronous detection by a chopper/lock-in amplifier, optical power meter, optical spectrum analyzer, interferometer, or polarimeter. To use the entire spectral range of the source, the detection system shall have a wavelength range, which includes the wavelengths produced by the light source. See the appropriate annex (A, B, C, D, E, F or G) for additional details.

8.9 Computer or test platform

Use a computer or appropriate test platform to perform operations such as controlling the apparatus, taking intensity measurements, and processing the data to obtain the final results.

8.10 Means to reduce the effects of amplified spontaneous emission

ASE results in the depolarization of the received light. Depending on the implementation and method, the following alternatives can be used:

- modulation of the signal light in combination with an electrical filter within the detection electronics;
- a tuneable optical filter locked to the wavelength of the signal, placed at the output of the fibre link.

9 Sampling and specimens

A specimen is one of the link configurations listed in Clause 6. Except for Method C, the link should be measured at a time when vibrations or temperature variations are minimized over the time period of the measurement. It may be necessary for the extent of any change in the SOP to be monitored to verify that conditions are sufficiently stable for the test system.

If the link includes optical amplifiers, ROADMs, or other active devices, they should be turned on.

10 Procedure

- a) Prepare the ends of the link by inspecting the connector end faces in accordance with IEC 61300-3-35 and by cleaning, if required, following the recommendation of IEC TR 62627-01. For Methods D and G, ensure that there is a strong enough reflection from the far end of the cabling under test and, if required, attach a reflective termination. For Method D, an angled fibre end is required at the input to minimize reflections from the input end.

- b) Attach the ends to the input and output optics.

NOTE For Methods D and G, the input and output optics are the same; the end of the link to which they are attached will be called the input end.

- c) Verify that there is enough signal strength present for the measurement.
- d) Verify that the signal is sufficiently polarised.
- e) Verify that the SOP is sufficiently stable for the measurement to be carried out.
- f) Engage the computer or test platform to complete the scans and measurements found in Annexes A, B, C, D, E, F or G for the seven measurement methods.
- g) Verify that the measurement scan is valid and exhibits the expected characteristics.
- h) Store the measurement scan and complete the required documentation.

- i) If required to improve the statistical basis of a measurement set, change the input and output state of polarization and repeat the measurement as many times as required to give the required measurement uncertainty.

11 Calculation or interpretation of results

Annexes A, B, C, D, E, F and G provide calculations to convert the measured data into DGD or PMD values.

IEC TR 61282-3 provides information on the calculation of the link PMD based on the statistics of optical fibre and component values.

12 Documentation

12.1 Information required for each measurement

- Link:
 - identification;
 - description, for example presence of optical amplifiers or other components;
 - length (km);
 - fibre and cable types.
- Testing date
- Test results:
 - PMD value as PMD_{AVG} or PMD_{RMS} ;
 - spectrum and linewidth of the test set-up light source;
 - DGD as a function of wavelengths or/and frequencies for Methods B, D, E, F;
 - interferogram for Method C;
 - intensity as a function of wavelengths or frequencies and Fourier transform for Method A;
 - for WSOSA – the detail of the wavelengths and wavelength increments used for the measurement.
- Wavelength or frequency range over which the measurement is performed.

12.2 Information to be available

The following information will normally be traceable by recording the make, model, serial number, and relevant module details of the equipment used.

- Test set-up:
 - measurement method;
 - calculation approach (analysis);
 - description of equipment:
 - source detailed characteristics;
 - analyzer detailed characteristics;
 - any other accessories if used.
 - calibration:
 - date of latest calibration;
 - method of calibration;
 - uncertainty analysis.
- For Methods B, D, E and G, the number of wavelengths sampled.

- For Method C, the type of fringe detection technique.

13 Specification information

- Wavelength range.
- Any deviations from this procedure.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61280-4-4:2017

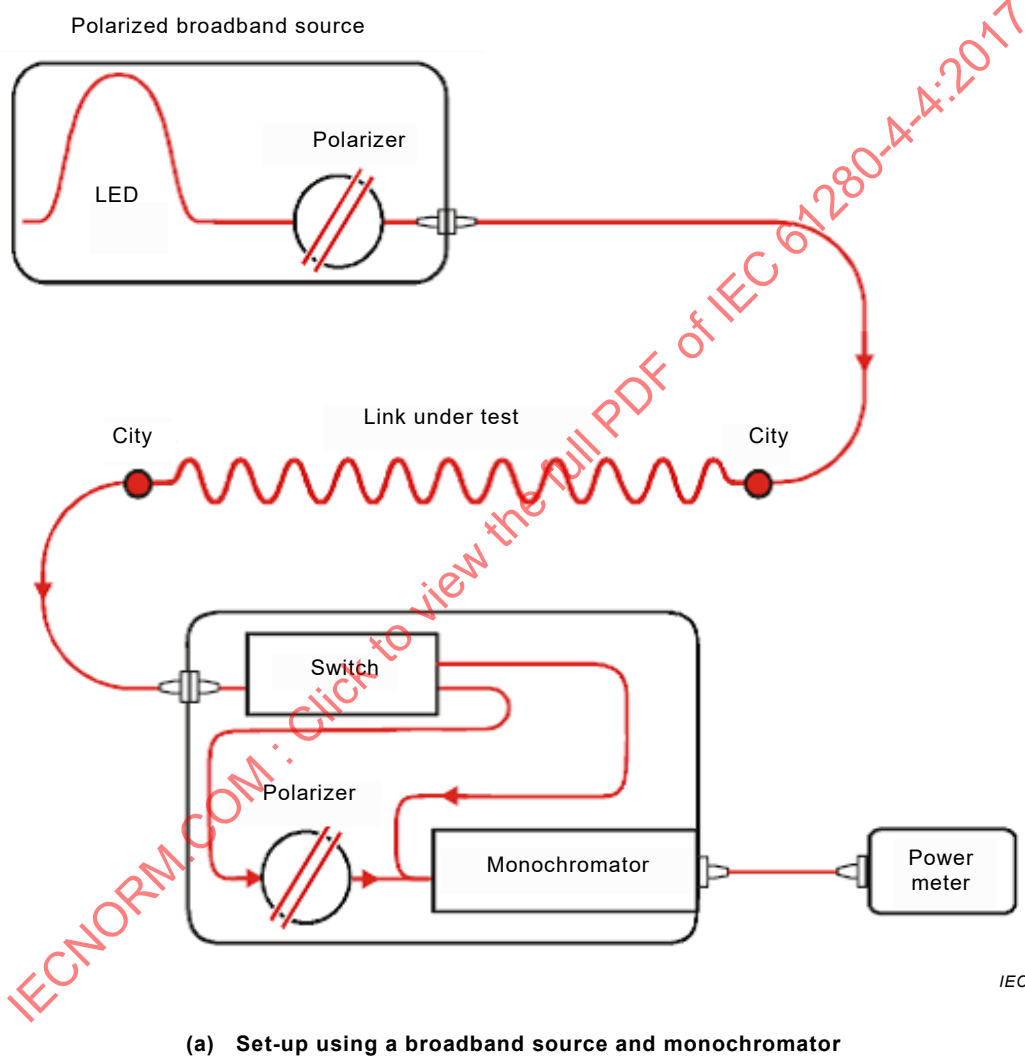
Annex A (normative)

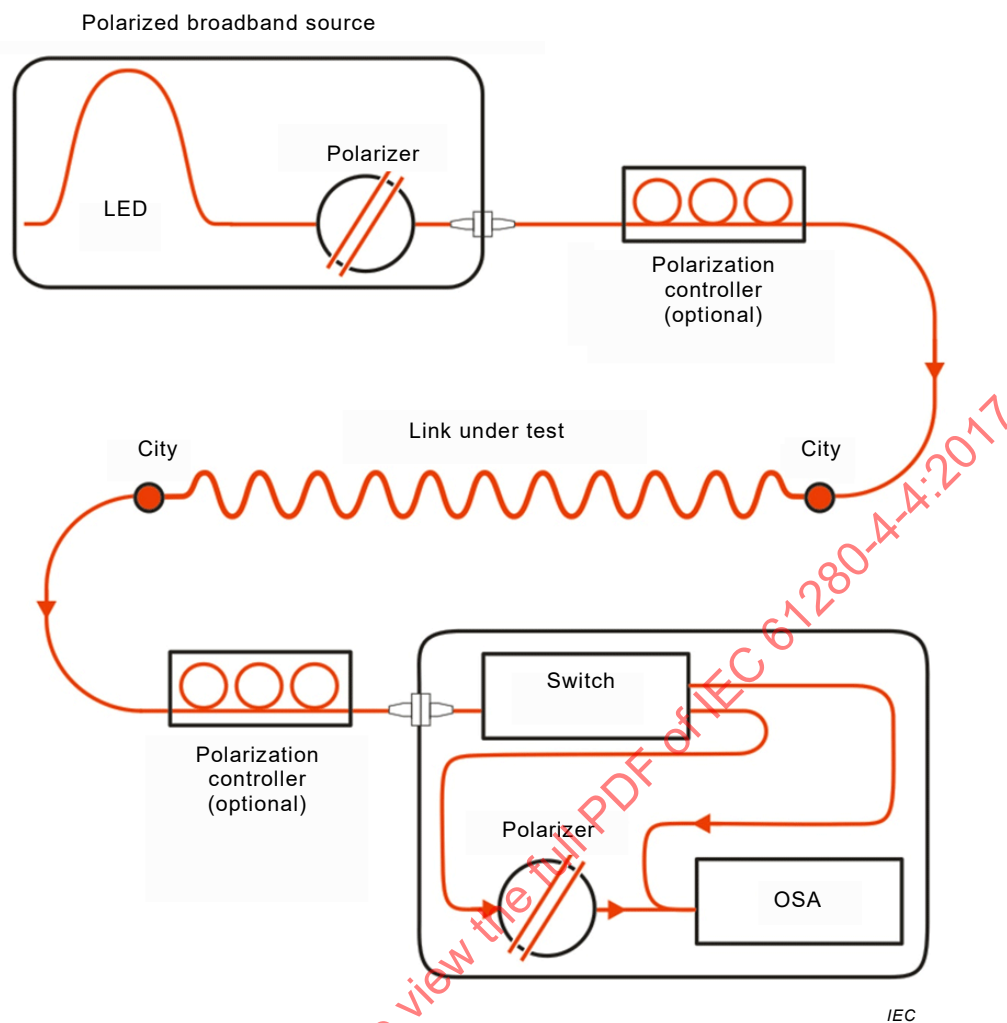
Fixed analyzer method

A.1 Apparatus

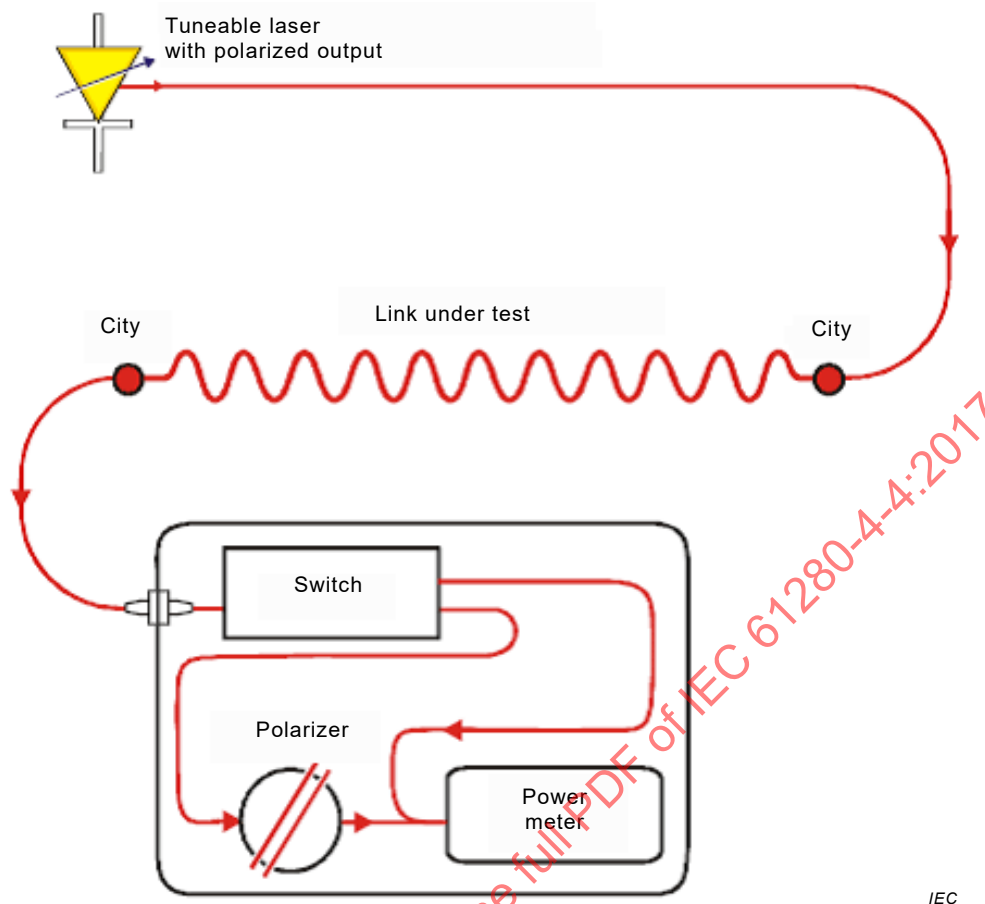
A.1.1 Block diagrams

Figure A.1 shows possible block diagrams.





(b) Set-up using a broadband source and optical spectrum analyzer (OSA)



(c) Set-up using a tuneable laser source

Figure A.1 – Block diagrams for fixed analyzer

A.1.2 Light source

In all cases, two kinds of light sources can be used, broadband or narrowband, depending on the type of analyzer. A broadband source such as the LED and polarizer combination shown in Figure A.1(a) and Figure A.1(b) can be used; an ASE source can be used to replace the LED. Alternatively, a narrow-band tuneable laser source can be used, as shown in Figure A.1(c).

Note that the measurement technique involves a reference scan of the power levels present as a function of wavelength, so the shape of the spectral content of the source has no effect on the measurement. There is no requirement for a continuous spectrum, so this technique can also be applied to systems containing optical filters (such as ROADMs).

When a broadband source is used, wavelength selection can be carried out using a narrow bandpass filtering analyzer such as an optical spectrum analyzer, a monochromator or an interferometer used as a Fourier transform spectrum analyzer placed before the analyzer. In the case of broadband source, the width of the filter is taken as the spectral width for the purpose of calculations.

In both cases, the spectral width shall be sufficiently small to maintain the desired DOP (see 8.2), but not too small compared to the selected step size to avoid unnecessary coherent interference effects and other spurious noises. In both cases, the range of wavelengths shall be sufficient to provide a PMD measurement of sufficient precision at the specified wavelength region (see A.3).

To insure that all features in the optical spectrum are adequately resolved, the spectral width should satisfy:

$$\Delta\lambda / \lambda_0 < (8\nu\Delta\tau_{\max})^{-1} \quad (\text{A.1})$$

where

$\nu = c/\lambda$ is the optical frequency;

$\Delta\lambda$ is the spectral width;

$\Delta\tau_{\max}$ is the maximum anticipated DGD.

For λ in the vicinity of 1 550 nm, Equation (A.1) reduces to the condition that $\Delta\lambda$ (nm) should be less than the reciprocal of $\Delta\tau$ (ps).

A.1.3 Analyzer

The angular orientation of the analyzer is not critical but should remain fixed throughout the measurement. With negligible mode coupling or low PMD values, some adjustment of the analyzer can be helpful in maximizing the amplitude of the oscillations in Figure A.2. This can also be achieved by manipulating the test cords at the input or output to adjust the state of polarization of the signal entering the receiver.

NOTE The analyzer can be replaced by a polarimeter.

A.1.4 Optional polarization control at the input and output of the link under test

It is an option to insert polarization controllers at the input and output of the link under test. The precision of the measurement will be improved when averaging multiple measurements performed for various polarization launch conditions at the input and output. The polarization changes can be either random or in a controlled sequence, the important factor being the achievement of a representative set of polarization states on the Poincaré sphere. The polarization states can be modified in between two spectral scans or be continuously scanned at a rate sufficiently slow compared to the spectral scan speed.

Note that it is also possible to generate a polarization rotation over a given wavelength span by using a Lyot type depolarizer at the input. The periodic polarization oscillations induced by the Lyot depolarizer can be demodulated in the time domain, which is straightforward with the Fourier transform of the optical spectrum or on an interferogram. Provided the polarization covering is sufficient over the wavelength span considered, the Lyot depolarizer efficiently replaces the input polarization controller and avoids multiple input states, therefore strongly reducing the acquisition time.

A.2 Procedure

A.2.1 Wavelength range and increment

The procedure requires measuring the power as a function of wavelengths (or optical frequencies) over a range at a defined wavelength increment, once with the analyzer in the optical path and once without. The wavelength range can influence the precision of the result (see Clause A.3). The wavelength increment should be selected to satisfy Equation (A.1), with the wavelength increment replacing $\Delta\lambda$.

If the Fourier transform method is used, the wavelength increment should ideally be uniform in optical frequency, and the number of steps should be a power of 2. The monochromator step-size, expressed in optical frequency, $\delta\nu$, shall be a factor of two smaller than the "oscillation frequency" corresponding to the maximum DGD measured. Because of the large amount of power outside the second moment for highly mode-coupled fibres, the Nyquist condition

requires a frequency increment smaller than three times the frequency of the RMS width (second moment) associated with the maximum anticipated DGD. That is:

$$\frac{1}{6\delta\nu} > \Delta\tau_{\max} \quad (\text{A.2})$$

NOTE The source spectral width is generally equal to or less than the smallest wavelength increment. For example, for $\Delta\tau_{\max} = 0,67$ ps, a monochromator spectral width of 2 nm at 1 550 nm ($\delta\nu = 249$ GHz) is typical.

If from the Fourier transform it is evident that there is significant energy near $\Delta\tau_{\max}$, the measurement should be repeated with a reduced increment.

A.2.2 Complete the scans

Complete the scan with the analyzer in the light path. Record the received power as $P_A(\lambda)$.

Remove the analyzer from the light path and repeat the scan. Record the total received power as $P_{\text{Tot}}(\lambda)$.

NOTE 1 Alternatively, the measurement can be completed on a point by point basis by recording the power levels with and without the analyzer for each wavelength and then moving on to the next wavelength.

NOTE 2 Fast scanning systems such as an optical spectrum analyzer will reduce the impact of fibre movement, causing a change in the state of polarization on the measurement. Fast scanning systems can be used successfully on aerial cables or in other installed environments where fibre movement can be observed. [4], [5].

Calculate the power ratio, $R(\lambda)$ as follows:

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_{\text{Tot}}(\lambda)} \quad (\text{A.3})$$

Figure A.2 shows an example of a randomly mode-coupled result typical of a link application.

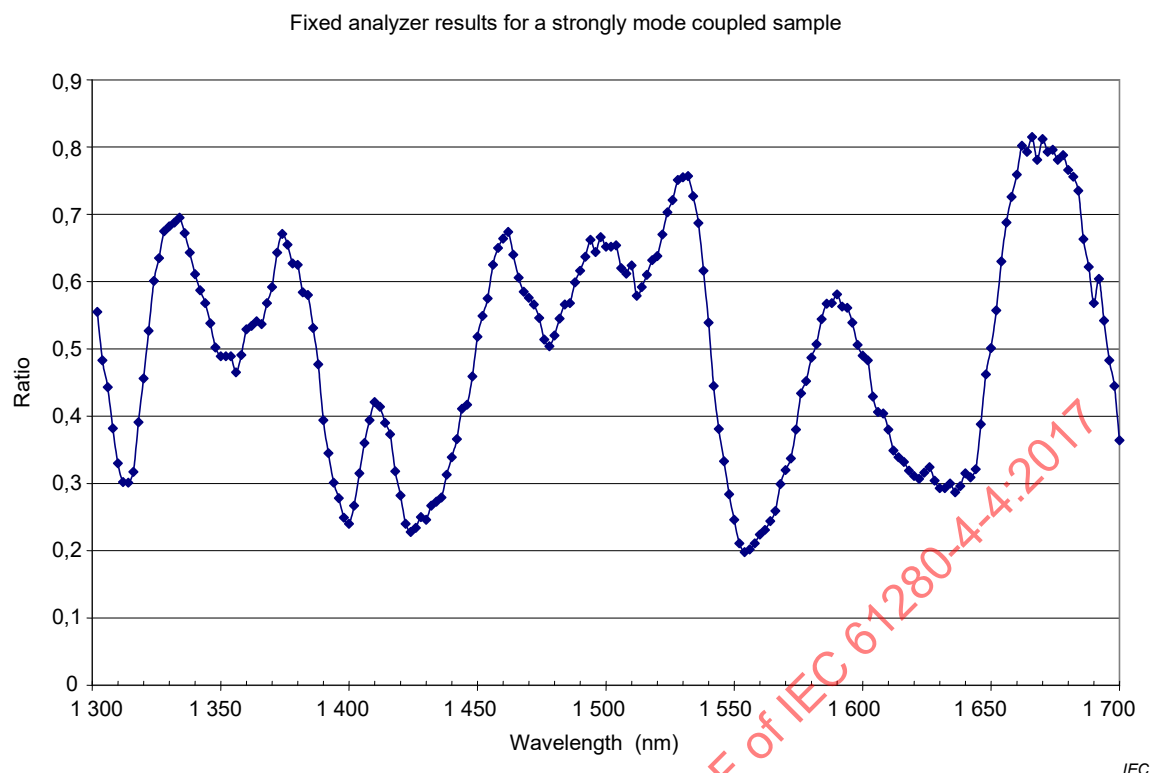


Figure A.2 – Example of the R-function for the fixed analyzer method

An alternative procedure is to leave the analyzer in place on the second scan, but rotate it 90°. Record the power as $P_B(\lambda)$. The formula for the power ratio is then:

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_A(\lambda) + P_B(\lambda)} \quad (\text{A.4})$$

NOTE 1 The cosine Fourier transform of the difference, $P_B - P_A$, divided by the sum is the cross-correlation function.

NOTE 2 If a polarimeter is used as the detection element, the normalized Stokes parameters are measured versus wavelength. The three spectral functions (one per vector element) are independent of received power and correspond to three independent difference functions between orthogonal analyzer states that can be analyzed in the same way.

A.3 Calculations – Fourier transform

A.3.1 General

A Fourier analysis of $R(\lambda)$, usually expressed in the domain of optical frequency ν , is used to derive PMD. The Fourier transform transforms this optical frequency domain data to the time domain. The Fourier transform yields direct information on the distribution of light arrival times $\delta\tau$. These data are post-processed as described below to derive the expected PMD, $\langle\Delta\tau\rangle$, for the link under test. This method is applicable to links typically with random mode coupling. The method is, however, also applicable to negligible mode coupling.

Two additional analysis techniques are outlined in IEC TR 61282-9. These are cosine transform and spectral differentiation. These techniques would yield results that are mathematically equivalent to GINTY (Annex C). These techniques are not included in this document because there are no known commercial implementations.

A.3.2 Data pre-processing and Fourier transformation

To use this method, the Fourier transform normally requires equal intervals in optical frequency so that $R(\lambda)$ data are collected at λ values such that they form equal intervals in the optical frequency domain. Alternatively, data taken at equal λ intervals can be fitted (for example, by using a cubic spline fit) and interpolation used to generate these points, or more advanced spectral estimation techniques can be used. In each instance, the ratio $R(\lambda)$ at each λ value used is calculated using Equation (A.3) or Equation (A.4), as appropriate.

Zero-padding or data interpolation and DC level removal can be performed on the ratio data, $R(\lambda)$. Windowing the data may also be used as a pre-conditioning step before the Fourier transform. The Fourier transformation is now carried out to yield the amplitude data distribution $P(\delta\tau)$ for each value of $\delta\tau$.

A.3.3 Transform data fitting

A.3.3.1 General

Fourier transform data at zero $\delta\tau$ is due to the data having a non-zero average, which is sometimes referred to as direct current, or DC. Unless carefully removed, "DC" components in $R(\lambda)$ may be partially due to insertion loss of the analyzer, for example. When the "DC" level is not removed, up to two data points are generally bypassed (not used) in any further calculations. A variable, j , can be defined so that the "first valid bin" above zero $\delta\tau$ that is included in calculations corresponds to $j = 0$.

In order to remove measurement noise from subsequent calculations, $P(\delta\tau)$ is compared to a threshold level, T_1 , typically set to 200 % of the RMS noise level of the detection system. It is now necessary to determine whether the fibre is negligibly or randomly mode coupled.

If it is found that the first X valid points of $P(\delta\tau)$ are all below T_1 , this indicates that $P(\delta\tau)$ shall have discrete spike features characteristic of negligibly coupled fibres. The value of X is equal to 3, unless zero-padding is used in the Fourier analysis. In that case, the value of X can be determined from:

$$X = \frac{3 \times (\text{number_original_data_points})}{\text{total_length_of_array_after_zeropadding}} \quad (\text{A.5})$$

PMD is calculated using Equation (A.6) for a negligible mode coupling fibre, or PMD is calculated using Equations (A.7) and (A.8) for a random mode coupling fibre.

A.3.3.2 PMD calculation for fibres with negligible mode coupling

For a negligibly coupled fibre (e.g., a high birefringence fibre) or for a birefringent component, such as those used for calibration, $R(\lambda)$ resembles a chirped sine wave (Figure A.3). Fourier transformation will give a $P(\delta\tau)$ output containing a discrete spike at a position corresponding to the relative pulse arrival time, $\delta\tau$, the centroid of which is the PMD value $\langle \Delta\tau \rangle$.

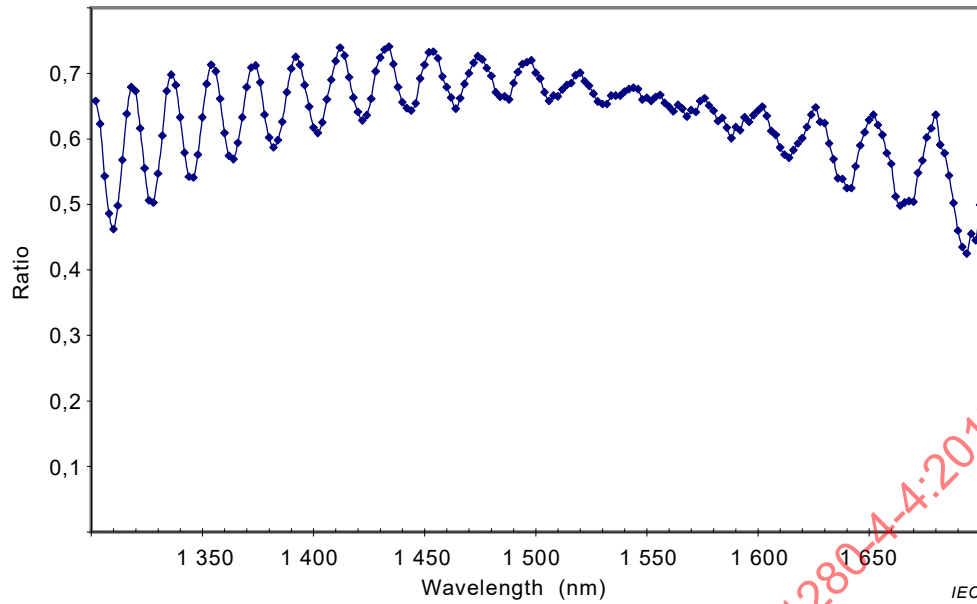


Figure A.3 – A chirped sine wave

To define the spike centroid $\langle \Delta\tau \rangle$, those points where $P(\delta\tau)$ exceeds a second pre-determined threshold level T_2 , typically set to 200 % of the RMS noise level of the detection system, are used in the equation:

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{\sum_{e=0}^{M'} [P_e(\delta\tau) \delta\tau_e]}{\sum_{e=0}^{M'} P_e(\delta\tau)} \quad (\text{A.6})$$

Therefore, $M' + 1$ is the number of data points of P within the spike which exceed T_2 .

In Equation (A.6), $\langle \Delta\tau \rangle$ is typically quoted in picoseconds. If no spike is detected (i.e., $M' = 0$), then PMD is zero. Other parameters such as the RMS spike width and/or spike peak value can be reported.

If the device under test contains one or more birefringent elements, more than one spike will be generated. For a number n concatenated fibres/devices, up to $2^{(n-1)}$ spikes will be obtained.

A.3.3.3 PMD calculation for fibres with random mode coupling

In instances of random mode coupling, $R(\lambda)$ becomes a complex waveform similar to Figure A.2, the exact characteristics being based on the actual statistics of the coupling process within the fibre/cable. The Fourier transformed data now becomes a distribution $P(\delta\tau)$ representing the autocorrelation of the probability distribution of light pulse arrival times, $\delta\tau$, in the fibre. Figure A.4 shows the Fourier transform of the result of a random mode coupling measurement.

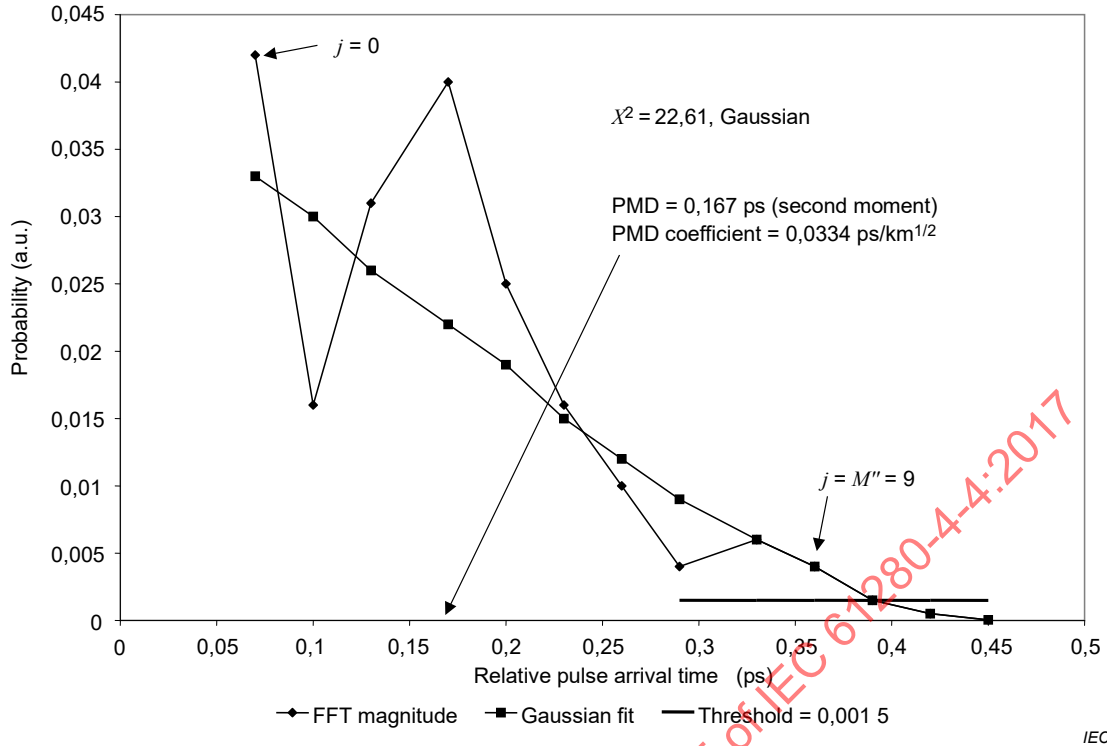


Figure A.4 – PMD by Fourier analysis

Counting up from $j = 0$, the first point of P is determined which exceeds T_1 , and which is followed by at least X data points which fall below T_1 . This point represents the last significant point in (i.e., the "end" of) the distribution $P(\delta\tau)$, for a randomly mode-coupled fibre that is not substantially affected by measurement noise. The $\delta\tau$ value for this point is denoted $\delta\tau_{\text{last}}$, and the value of j at $\delta\tau_{\text{last}}$ is denoted M'' .

The square root of the second moment, σ_R , of this distribution defines the fibre PMD_{RMS} $\langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2}$ and is given by:

$$\langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2} = \sigma_R = \left\{ \frac{\sum_{j=0}^{M''} [P_j(\delta\tau) \delta\tau_j^2]}{\sum_{j=0}^{M''} [P_j(\delta\tau)]} \right\}^{1/2} \quad (\text{A.7})$$

When the DGD is assumed to follow a Maxwell distribution, the following gives the relationship of the RMS PMD to the PMD defined by the average:

$$\langle \Delta\tau \rangle = \left(\frac{8}{3\pi} \right)^{1/2} \langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2} \quad (\text{A.8})$$

A.3.3.4 PMD calculation for mixed coupling fibre systems

There can be instances where both negligibly coupled fibre/components and randomly coupled fibre(s) are concatenated to form a link. In this case, both centroid determination (Equation (A.6)) and the second moment derivation (Equation (A.7)) may be required. Note that spikes in $P(\delta\tau)$ can only be determined beyond the $\delta\tau_{\text{last}}$ computed.

A.3.4 Spectral range

For randomly coupled fibres, sufficient spectral range shall be used to form the spectral ensemble with sufficient precision. Using the widest possible spectral range (e.g., at least 200 nm) can minimize the statistical uncertainty. The precision required and, therefore, spectral range shall be specified prior to the measurement.

In addition, very low $\delta\tau$ values will give very long periods in $R(\lambda)$, and the spectral range λ_1 to λ_2 should cover at least two complete "cycles", if possible. The spectral range covered defines the smallest $\delta\tau$ value that can be resolved in $P(\delta\tau)$, $\delta\tau_{\min}$:

$$\delta\tau_{\min} = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)c_0} \quad (\text{A.9})$$

where the factor 2 is introduced to allow for the fact that two data points in P at and adjacent to 0 are generally ignored. For example, for $\lambda_1 = 1\,270\text{ nm}$, $\lambda_2 = 1\,700\text{ nm}$, $\delta\tau_{\min} = 0,033\text{ ps}$.

For negligibly coupled high PMD fibres with ratio data $R(\lambda)$ resembling Figure A.2, the requirement for spectral averaging described above can be relaxed, and the spectral range reduced (e.g., $\lambda_2 - \lambda_1 \sim 30\text{ nm}$) in order to allow variation of PMD with wavelength to be examined.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61280-4-4:2017

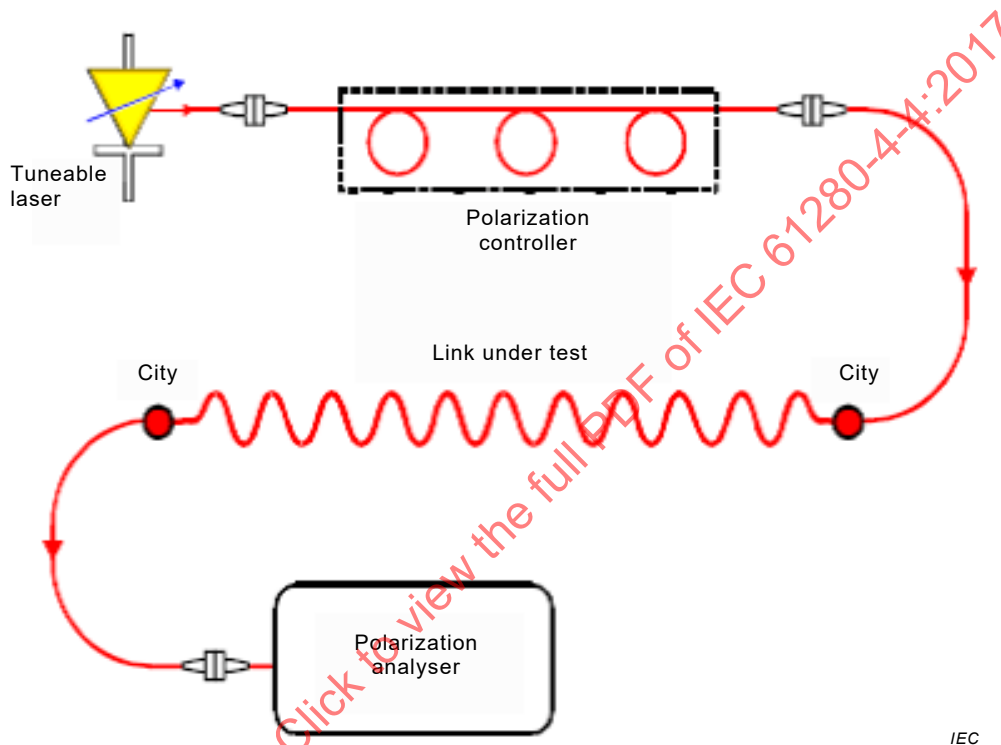
Annex B (normative)

Stokes parameter evaluation method

B.1 Apparatus

B.1.1 Block diagrams

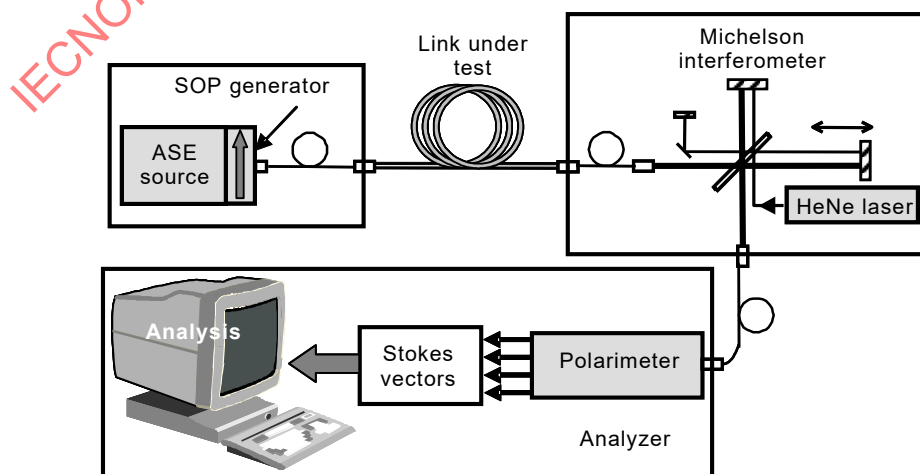
Figure B.1 shows a possible block diagram for Method B, typically used with JME.



IEC

Figure B.1 – Block diagram for Method B using a narrowband (tuneable laser) source

Figure B.2 shows another possible block diagram for Method B, typically used with PSA.



IEC

Figure B.2 – Block diagram for Method B using a broadband (ASE) source

B.1.2 Light source

In all cases, two kinds of light sources can be used, depending on the type of polarimeter. A narrowband source such as a tuneable laser shown in Figure B.1 can be used with a polarization analyzer. For amplified links, the DOP of the narrowband source shall be maintained higher than a certain limit throughout the wavelength range to avoid the detrimental effect of the ASE provided by amplifiers. Alternatively, a high power broadband source can be used with a narrow bandpass filtering polarimeter such as an optical spectrum analyzer or an interferometer used as a Fourier transform spectrum analyzer placed before the polarimeter, before or after the link under test. In the case of broadband source, the width of the filter is taken as the spectral width for the purpose of calculations. For amplified links, the broadband source has always a sufficient amount of wavelengths available to avoid the DOP requirement similar to the narrowband source, except if the link ASE is high and spectrally flat over the full wavelength range of interest.

In both cases, the spectral width shall be sufficiently small to maintain the required DOP (see 8.2), but not too small compared to the selected step size to avoid unnecessary coherent interference effects and other spurious noises. In both cases, the wavelength range shall be sufficiently wide to provide a valid PMD measurement of sufficient precision (see B.3).

The polarization controller shall be capable of scanning among at least three known and distinct SOPs (typically linear 0°, 45° and 90° (see Equation (E.4) for each measurement wavelength).

B.1.3 Polarimeter

Use a polarimeter to measure the output Stokes vectors for each selected input SOP and wavelength.

B.2 Procedure

The output of the link is coupled to the analyzer including the polarimeter. The wavelengths are scanned across a range appropriate for the wavelength region and desired precision (see B.3) with a wavelength increment, $\delta\lambda$. For narrowband sources, the wavelength increment is given in terms of the maximum anticipated DGD value, $\Delta\tau_{\max}$, the centre wavelength of the region measured, λ_0 , and the speed of light in vacuum, c (299792458 m/s), as:

$$\delta\lambda \leq \frac{\lambda_0^2}{2c\Delta\tau_{\max}} \quad (\text{B.1})$$

For example, the product of maximum DGD and step size shall remain less than 4 ps·nm at 1 550 nm and less than 2,8 ps·nm at 1 300 nm. This requirement ensures that from one test wavelength to the next, the output SOP rotates less than 180° about the principal states axis of the Poincaré sphere. If a rough estimate of $\Delta\tau_{\max}$ cannot be made, a series of sample measurements is performed across the wavelength range, each measurement using a closely spaced pair of wavelengths appropriate to the spectral width and minimum tuning step of the optical source. The maximum DGD measured in this way is multiplied by a safety factor of three. This value is substituted for $\Delta\tau_{\max}$ in the above expression, and the value of $\delta\lambda$ to be used in the actual measurement is computed. If there is concern that the wavelength increment used for a measurement is too large, the measurement can be repeated with smaller wavelength increment. If the shape of the curve of DGD versus wavelength and the mean DGD are essentially unchanged, the original wavelength increment is satisfactory.

For broadband sources, the resolution bandwidth (RBW) of the analyzer shall satisfy the following:

$$RBW_{\lambda} \leq \frac{\lambda^2}{5c\Delta\tau_{\max}} \quad (\text{B.2})$$

The measurement data are gathered for each wavelength. For each wavelength, the input SOPs are cycled through the states used (see Equation (E.4)), and the correspondent output Stokes vectors $\hat{H}$, $\hat{V}$ and $\hat{Q}$ are recorded. The output Stokes vectors are normalized to unit length. For the JME calculation, B.3.2, the normalized Stokes vectors shall be converted to normalized Jones vectors using Equation (E.4) (assuming $0 < \theta < \pi$) before the calculation is completed. For the PSA method, B.3.3, the normalized output Stokes vectors are used without conversion.

NOTE Fast scanning systems such as swept wavelength tuneable laser will reduce the impact of fibre movement causing a change in the state of polarization on the measurement. Fast scanning systems can be used successfully on aerial cables or in other installed environments where fibre movement can be observed. [4], [5].

B.3 Calculations

B.3.1 General

The calculation approaches require evaluation of differences between the vectors at one angular optical frequency, ω , and the next at $\omega + \Delta\omega$ (angular optical frequency is given by $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$). Both calculation approaches result in a series of DGD values versus wavelength.

Figure E.4 shows an example of such a function. Alternatively, the DGD values can be displayed as a histogram such as Figure E.5.

The average of these DGD values is reported as the PMD value.

NOTE The JME and PSA calculations are mathematically equivalent for first-order PMD assumptions and where negligible PDL is present.

B.3.2 Jones matrix eigenanalysis (JME)

B.3.2.1 General

For the JME, the response Jones matrix is computed at each wavelength from the Stokes parameters. For each wavelength increment, the product of the Jones matrix $T(\omega + \Delta\omega)$ at the higher optical frequency and the inverse Jones matrix $T^{-1}(\omega)$ at the lower optical frequency are computed. The DGD $\Delta\tau$ for the particular wavelength increment is found from the following argument formula:

$$\Delta\tau = \left| \frac{\text{Arg}\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)}{\Delta\omega} \right| \quad (\text{B.3})$$

where

ρ_1 and ρ_2 are the complex eigenvalues of $T(\omega + \Delta\omega)T^{-1}(\omega)$;

Arg denotes the argument function, that is, $\text{Arg}(\eta e^{i\theta}) = \theta$, where η is the magnitude (real) of the complex number;

NOTE $T(\omega + \Delta\omega)$ and $T(\omega)$ are obtained from measurements and calculations of B.3.2.2.

For purposes of data analysis, each DGD value is the DGD at the lower frequency. The series of DGD values obtained from a series of wavelength increments across a wavelength range comprises a single link PMD measurement.

B.3.2.2 Jones matrix eigenanalysis (JME) DGD calculation

R.C. Jones gave an explicit algorithm for experimentally determining the forward transmission Jones matrix T of an unknown linear, time-invariant optical link [2]. The restriction of linearity precludes optical links that generate new optical frequencies. The restriction of time invariance applies only to the polarization transformation caused by the link and does not include the absolute optical phase delay. Therefore, this technique can be used to characterize fibre networks even when the phase delay through the fibre is drifting during the measurement, provided that the DGD measurement apparatus is not affected by phase delay changes.

Measurement of the Jones matrix requires the application of three known and distinct SOPs such as of linearly polarized light to the link. In the process described below, linear SOPs oriented at 0° , 45° and 90° are used, as described by Jones and as illustrated in Figure E.3. The mathematics can be generalized to accommodate other input SOPs.

Any Jones vector V can be completely specified by a magnitude, an absolute phase, and a unit vector $\hat{V}$, which locates the SOP on the Poincaré sphere. To measure the Jones matrix of a link, a stimulus optical field of linear SOP parallel to the x (0°) axis is first generated, and the resulting response unit Jones vector $\hat{H}$ is measured/calculated at the output of the link. Similarly, stimulus fields of linear SOP parallel to the y (90°) axis, and parallel to the bisector of the angle between the positive x and y axes (45°) result in response unit Jones vectors $\hat{V}$ and $\hat{Q}$ respectively.

Three complex ratios independent of the intensities of the three stimulus fields can now be formed from the x and y components of $\hat{H}$, $\hat{V}$ and $\hat{Q}$:

$$k_1 = \hat{h}_x / \hat{h}_y \quad k_2 = \hat{v}_x / \hat{v}_y \quad k_3 = \hat{q}_x / \hat{q}_y \quad (\text{B.4})$$

A fourth ratio $k_4 = (k_3 - k_2) / (k_1 - k_3)$ is then found. To within a complex constant β , the transmission Jones matrix T is then given by:

$$T = \begin{bmatrix} k_1 k_4 & k_2 \\ k_4 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

B.3.2.3 Differential group delay (DGD) determination

The Jones matrix frequency transfer matrix, J , is calculated as:

$$J(\omega) = T(\omega + \Delta\omega)T^{-1}(\omega) \quad (\text{B.6})$$

The DGD $\Delta\tau$ is calculated as:

$$\Delta\tau = |\text{Arg}(\rho_1 / \rho_2) / \Delta\omega| \quad (\text{B.7})$$

where

ρ_1 and ρ_2 are the eigenvalues of $J(\omega)$;

Arg denotes the argument function, that is, $\text{Arg}(\alpha e^{i\theta}) = \theta$.

In practice, the impact of PDL on the measurement of $\Delta\tau$ can be reduced by using smaller intervals of radian optical frequency $\Delta\omega$. In all cases, the condition $\Delta\tau\Delta\omega < \pi$ shall be satisfied in order to avoid the ambiguities of the multiple-valued argument function.

B.3.3 Poincaré sphere analysis (PSA) DGD calculation

The analysis presented in [7] is an alternative to the argument function of JME. It is based on an arcsine function.

From the measured normalized Stokes vectors, $\hat{H}$, $\hat{V}$, $\hat{Q}$, compute:

$$\hat{h} = \hat{H}, \quad \hat{q} = \frac{\hat{H} \times \hat{Q}}{|\hat{H} \times \hat{Q}|} \times \hat{H}, \quad \hat{v} = \frac{\hat{q} \times \hat{V}}{|\hat{q} \times \hat{V}|} \times \hat{q} \quad (\text{B.8})$$

This makes the analysis independent of the input SOPs, and consequently there is no need to know them.

From the Stokes vectors, $\hat{h}$, $\hat{v}$ and $\hat{q}$, form the vector cross products $\hat{c} = \hat{h} \times \hat{q}$ and $\hat{c}' = \hat{q} \times \hat{v}$ at each wavelength. For each wavelength increment, compute the finite differences:

$$\begin{aligned} \Delta\hat{h} &= \hat{h}(\omega + \Delta\omega) - \hat{h}(\omega) & \Delta\hat{q} &= \hat{q}(\omega + \Delta\omega) - \hat{q}(\omega) & \Delta\hat{v} &= \hat{v}(\omega + \Delta\omega) - \hat{v}(\omega) \\ \Delta\hat{c} &= \hat{c}(\omega + \Delta\omega) - \hat{c}(\omega) & \Delta\hat{c}' &= \hat{c}'(\omega + \Delta\omega) - \hat{c}'(\omega) \end{aligned} \quad (\text{B.9})$$

Find the DGD, $\Delta\tau$, for a particular wavelength increment from the following expression:

$$\Delta\tau = \frac{1}{\Delta\omega} \cdot \left[\arcsin \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2} (\Delta\hat{h}^2 + \Delta\hat{q}^2 + \Delta\hat{c}^2)} \right) + \arcsin \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2} (\Delta\hat{q}^2 + \Delta\hat{v}^2 + \Delta\hat{c}'^2)} \right) \right] \quad (\text{B.10})$$

NOTE $\Delta\hat{h}^2 = \Delta\hat{h} \cdot \Delta\hat{h}$

Each DGD value is taken to represent the DGD at the midpoint of the corresponding wavelength increment.

Annex C (normative)

Interferometric method

C.1 General

Annex C contains detailed requirements for completing PMD measurements using the interferometric method (INTY) – Method C. This method normally reports the PMD_{RMS} (RMS DGD) metric (see Equation (2)), which can be converted to the $PMD_{average}$ (linear average DGD) metric using Equation (3), under the assumption of a perfect fit with a Maxwell distribution.

There are two versions of Method C with differing measuring set-ups and data analyses:

- the traditional analysis (TINTY) using a basic set-up [8-10];
- a general analysis (GINTY) using a modified set-up compared to TINTY [11].

A generic set-up is shown in Figure C.1, which is the basis of the experimental implementation of Method C (INTY). Variance of this set-up is possible and can be used as shown below.

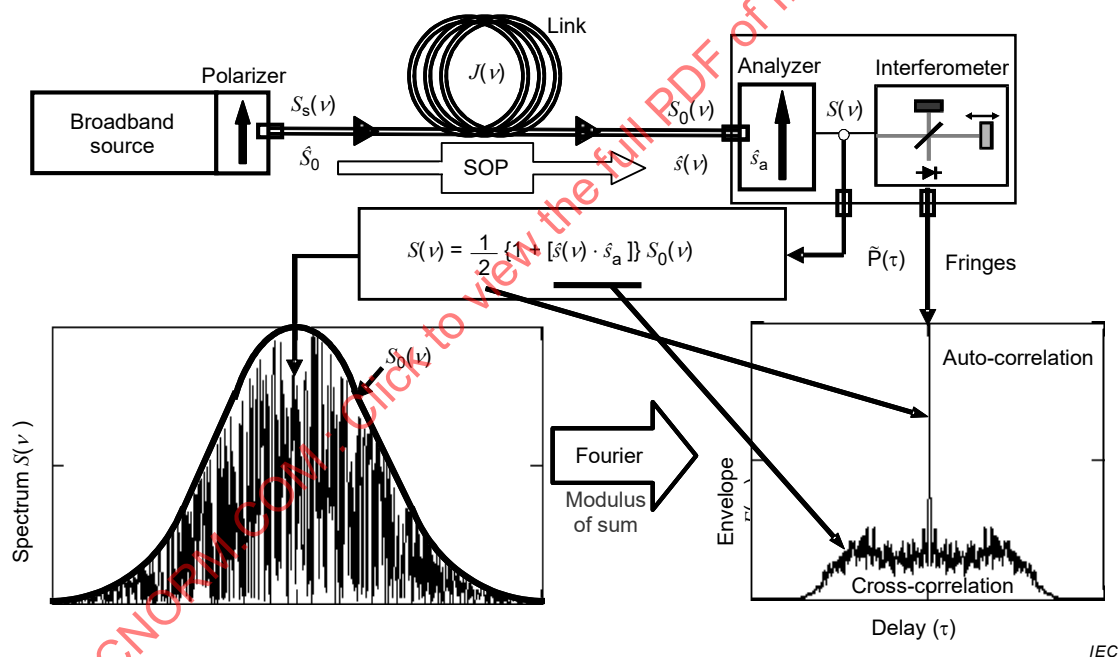


Figure C.1 – Generic set-up for Method C (INTY)

Parameters used in Figure C.1 and throughout Annex C are:

ν	optical frequency ($\nu\lambda = c$);
τ	difference of round-trip delay between the two arms of the interferometer;
$S_s(\nu)$	optical spectrum, at DUT input $\equiv$ spectral density of $\bar{E}_s(\nu)$, the source spectrum;
$S_0(\nu)$	optical spectrum, at DUT output (analyzer input);
$S(\nu)$	optical spectrum, at analyzer output (interferometer input);
$\hat{s}_0$	input SOP (at DUT input; a unit Stokes vector);

$\hat{s}(\nu)$	output SOP (at DUT output);
$\hat{s}_a(\nu)$	analyzer transmission axis;
$x(\nu) \equiv \hat{s}_A \times \hat{s}(\nu)$	Stokes parameter giving the projection of $\hat{s}(\nu)$ on the analyzer transmission axis. It is this parameter, $x(\nu)$, that contains the PMD information;
$P(\tau)$	optical power at the interferometer output, as a function of delay τ ;
$\tilde{P}(\tau)$	dependent part of $P(\tau)$ (AC part);
P_0	constant part of $P(\tau)$ (DC part);
$E(\tau)$	fringe envelope;
$Ex(\tau)$	cross-correlation envelope;
$E_0(\tau)$	auto-correlation envelope.

The optical power at the interferometer output, $P(\tau)$ is equal to the sum of AC and DC parts. Both parts are equal at $\tau = 0$ so the AC part can be calculated. For an ideal interferometer, the AC part is an even function, the right half of which is equal to the cosine Fourier transform of the optical spectrum, $S(\nu)$, emitted from the analyzer. For non-ideal interferometers, some corrections can be applied, depending on the details of the implementation.

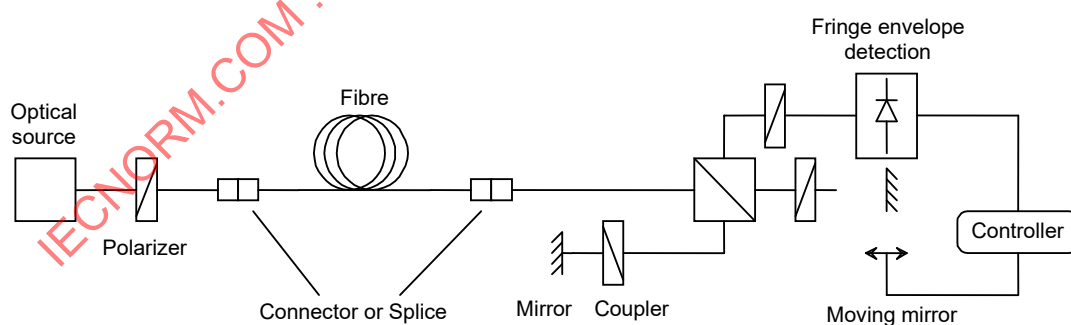
For TINTY, the envelope of the interferogram, $E(\tau)$, is the absolute value of the AC part. For GINTY, additional calculations to obtain the cross-correlation and auto-correlation envelopes are described in C.3.2.4. These calculations involve two measured interferograms resulting from the analyzer being set at two orthogonal SOPs.

C.2 Traditional analysis (TINTY)

C.2.1 Apparatus

C.2.1.1 Block diagram

Figure C.2 shows a block diagram for link measurements using Method C (TINTY).



IEC

Figure C.2 – Schematic diagram for Method C (TINTY)

C.2.1.2 Light source

A polarized broadband light source is used that emits radiation at the intended measurement wavelengths, such as a LED or a superfluorescent source. The centre wavelength, λ_0 , shall be within the 1 310 nm or 1 550 nm windows or any other window of interest. The spectral shape shall be approximately Gaussian, without ripples that could influence the autocorrelation function of the emerging light. The source linewidth (also called spectral width in the LED field), $\Delta\lambda$, shall be known to calculate the coherence time, t_c , which is determined with the following:

$$t_c = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda c} \quad (\text{C.1})$$

where

λ_0 is the source centre wavelength;

$\Delta\lambda$ is the source linewidth;

c is the speed of light in vacuum.

C.2.1.3 Beam splitter

The beam splitter is used to split the incident polarized light into two components propagating in the arms of the interferometer. The splitter can be an optical fibre coupler or a corner-cube beam splitter.

C.2.1.4 Interferometer

A Michelson type interferometer of either an air type or a fibre type is located at the detector end of the link under test.

C.2.2 Procedure

C.2.2.1 Calibration

The equipment is calibrated by measuring a high birefringent fibre of known PMD. Alternatively, an assembly of high birefringent fibres of known PMD can also be measured.

C.2.2.2 Routine operation

One end of the link is coupled to the polarized output of the light source. The other end is coupled to the interferometer input.

The optical output power of the light source is adjusted to a reference value characteristic for the detection system used. To get a sufficient fringe contrast, the optical power in both arms of the interferometer shall be almost identical.

A first acquisition is made by moving the mirror of the interferometer arm and recording the intensity of the light. From the obtained fringe pattern for one selected SOP, the PMD delay can be calculated as described in C.2.3. A typical example of a fringe pattern for random polarization mode coupling is shown in Figure C.3. The fringe pattern shall be a smooth Gaussian spectrum representative of an ideal random mode coupling.

In case of insufficient mode-coupling, or in case of low PMD, it is recommended that the measurement be repeated for different SOPs or that the polarization state be modulated during the measurement in order to obtain a result which is an average over all the SOPs.

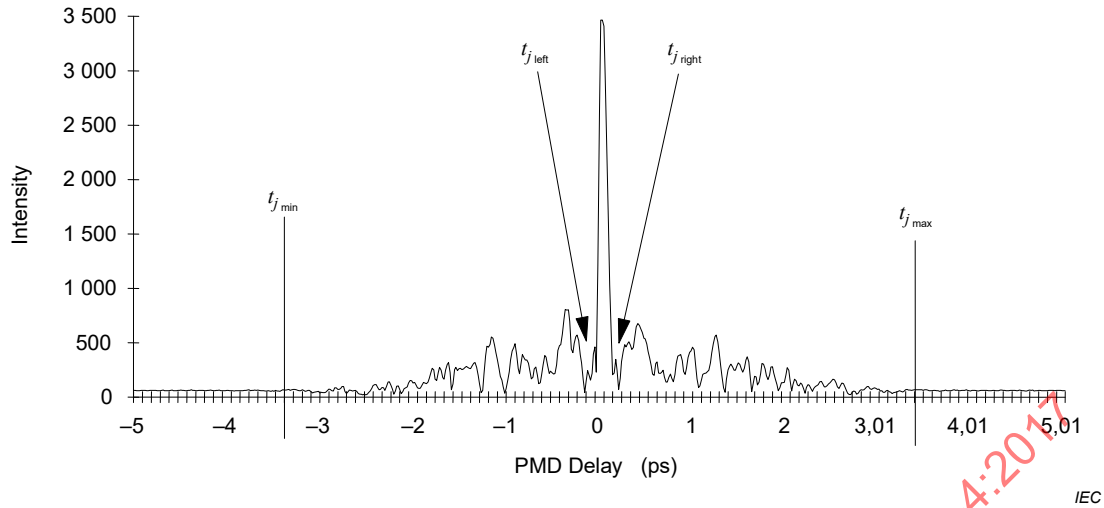


Figure C.3 – Typical data obtained by Method C (TINTY)

C.2.3 Calculations

The following calculations are suitable for the strong/random mode-coupling regime associated with links. The spread in the interferogram – discounting the centre peak – is characterized.

The PMD_{RMS} value is determined from the second moment (RMS width) of the cross-correlation function of the detected signal (interferogram).

$$PMD_{RMS} = \left(\sqrt{\frac{3}{4}} \right) \sigma_{\varepsilon} \quad (C.2)$$

where σ_{ε} is the RMS width of the cross-correlation envelope. A detailed algorithm for the calculation from a measured fringe envelope is described in Annex H.2.

For certain assumptions given below, Equation (C.2) can be related to Equation (2) as:

$$\langle \Delta \tau^2 \rangle = \frac{3}{4} \langle \sigma_{\varepsilon}^2 \rangle \quad (C.3)$$

Equation (C.3) is obtained from the theory [8-10] given the following assumptions (notably):

- ideal random mode coupling;

NOTE 1 Ideal random coupling means $L/h \rightarrow \infty$, and a uniformly distributed birefringence axis. L is the device length and h is the polarization coupling-length. For a device consisting of N concatenated birefringent segments of length h , this corresponds to $N \rightarrow \infty$ with uniformly distributed axes.

NOTE 2 Analysis of no or negligible mode coupling is possible.

- a purely Gaussian source, with no ripples;
- $PMD \gg \sigma_0$

where σ_0 is the RMS width of the auto-correlation envelope;

- ergodic conditions.

NOTE 3 Given that the source is Gaussian, the result will be some form of weighted average of the DGD values. This weighting is not specified in TINTY but is in GINTY. For this reason, Method C (TINTY) is expected to give a different result for a given wavelength range and time than one of the methods that use a rectangular weighting. The assumption of ergodic conditions does result in the validity of the expected value relationship. In practice, the wavelength ranges sampled by different implementations of the other methods will also vary, which would imply getting different results between them as well.

C.3 General analysis (GINTY)

C.3.1 Benefit

GINTY allows some of the assumptions required for Equation (C.3) with TINTY to be removed, notably:

- the assumption of ideal random mode coupling is not required;
- the assumption of a Gaussian source is not required;
- the assumption that the PMD is large compared to the width of the auto-correlation function is not required.

C.3.2 Apparatus

C.3.2.1 Block diagram

In addition to the set-up shown in Figure C.2, Figure C.4 shows a block diagram for link measurements using Method C (GINTY).

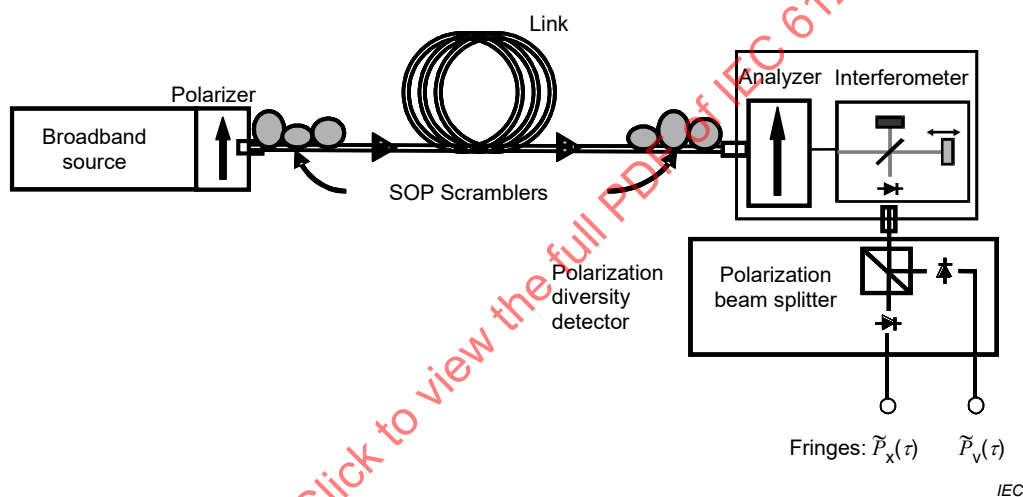


Figure C.4 – Schematic diagram for Method C (GINTY)

When Method C (GINTY) uses the set-up shown in Figure C.4, two interferograms, P_x and P_y , are obtained. These two interferograms correspond to two orthogonal analyzer settings using the setup of Figure C.1. The polarization scramblers allow randomizing both the input SOP and the base of the two effective output analyzer states. The "fringes" shown in Figure C.4 correspond to the AC parts of the idealized interferograms, which could also be obtained from the setup of Figure C.1 for a given pair of input polarizer and base analyzer settings. The sum and difference of these two fringe arrays are squared to obtain the squared envelope of the auto-correlation and cross correlation functions.

C.3.2.2 Light source

A broadband light source is used that emits radiation at the intended measurement wavelengths, such as a LED or a superfluorescent source. The centre wavelength shall be within the 1 310 nm or 1 550 nm windows or any other window of interest. There are no other particular requirements for the source spectrum.

C.3.2.3 Polarizers/scramblers

Polarization scrambling can be used as detailed in 7.6.

C.3.2.4 Polarization beam splitter

A polarization beam splitter (PBS) can be used to obtain interferograms from output SOPs that are orthogonal (opposite on the Poincaré sphere) for the same I/O-SOP combination. These two interferograms allow the calculation of the autocorrelation and cross-correlation as separate functions. Together with the detection system, the PBS forms a polarization diversity detection system. Means other than the PBS can be used to obtain these interferograms from orthogonal output SOPs.

The two fringe patterns observed with two orthogonal analyzer-axes (opposite on the Poincaré sphere) can be used to calculate the auto-correlation and cross-correlation envelopes as:

- auto-correlation envelope for a single I/O-SOP:

$$E_0(\tau) = \left| \tilde{P}_x(\tau) + \tilde{P}_y(\tau) \right| \quad (C.4)$$

- cross-correlation envelope for a single I/O-SOP:

$$E_x(\tau) = \left| \tilde{P}_x(\tau) - \tilde{P}_y(\tau) \right| \quad (C.5)$$

C.3.2.5 Interferometer

A Michelson type interferometer of either an air type or a fibre type is located at the detector end of the link under test.

C.3.3 Procedure

C.3.3.1 Calibration

The equipment is calibrated following C-2.2.1.

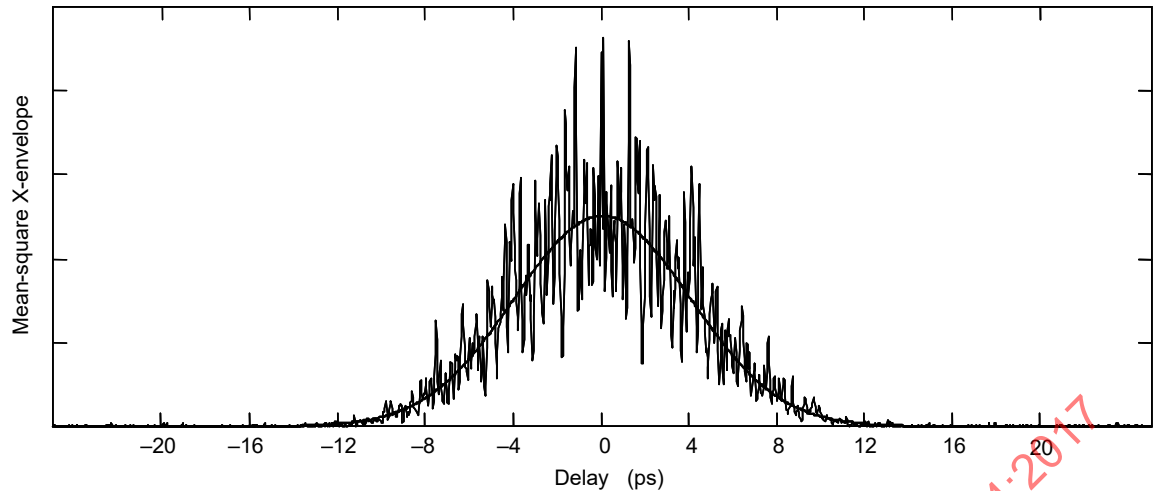
C.3.3.2 Routine operation

In the case of the set-up used as in Figure C.2, one end of the link is coupled to the polarized output of the polarized light source. The other end is coupled to the interferometer input. When the set-up shown in Figure C.4 is used, one end of the link is coupled to the output of the scrambler-polarizer combination. The other end is coupled to the input of the scrambler-interferometer combination.

The optical output power of the light source is adjusted to a reference value characteristic for the detection system used. To get a sufficient fringe contrast, the optical power in both arms of the interferometer shall be almost identical.

A first acquisition is made by moving the mirror of the interferometer arm and recording the intensity of the light. From the obtained fringe pattern for one I/O-SOP combination or from I/O-SOP scrambling, the PMD delay can be calculated as described in C.3.4. Typical examples of mean squared cross-correlation envelopes for random and mixed polarization mode couplings representative of link applications are shown in Figures C.5 and C.6 respectively:

- Figure C.5. Random mode coupling, $L/h = 100$, $PMD = 4,94$ ps, $\sigma_A = 50$ fs, $PMD/\sigma_A \sim 100$

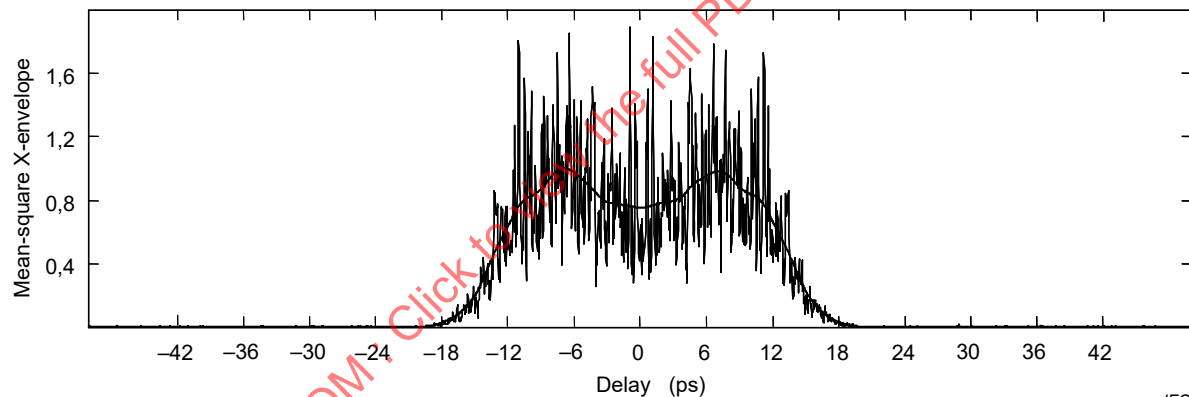


IEC

NOTE Smoothing is only used as a visual guide; analysis is neither performed on the smoothing nor any kind of fit.

Figure C.5 – Typical random-mode-coupling data obtained by Method C (GINTY)

- Figure C.6. Mixed mode coupling, nearly-flat envelope; the definition of L/h loses its significance; the DUT is made of 1 random-mode-coupling section with $L/h = 10 + 1$ negligible-mode-coupling section with $DGD = PMD_{\text{Random}}/4$, $PMD = 9,97$ ps, $\sigma_A = 50$ fs



IEC

NOTE Smoothing is only used as a visual guide; analysis is neither performed on the smoothing nor any kind of fit.

Figure C.6 – Typical mixed-mode-coupling data obtained by Method C (GINTY)

C.3.4 Calculations

The following calculations are suitable for any mode-coupling regime associated with links.

The determination of the PMD is based on the squared envelopes of the cross-correlation and auto-correlation interferograms.

First, form the envelopes $E_{0i}(\tau)$ and $E_{xi}(\tau)$ from Equations C.4 and C.5, from N raw interferogram pairs, one for each I/O-SOP combination (indexed with i). Second, form the squared envelopes $E_{0i}^2(\tau)$ and $E_{xi}^2(\tau)$. Third, calculate the mean squared envelopes as:

$$\bar{E}_0^2(\tau) = \frac{1}{N} \sum_i E_{0i}^2(\tau) \quad \bar{E}_x^2(\tau) = \frac{1}{N} \sum_i E_{xi}^2(\tau) \quad (\text{C.6})$$

Fourth, calculate the RMS width of the two sampled mean squared envelopes σ_0 and σ_x , respectively. A sample algorithm for this calculation is given in Clause H.3. The ideal definitions of these widths are:

$$\sigma_0^2 = \frac{\int \tau^2 \langle E_0^2(\tau) \rangle d\tau}{\int \langle E_0^2(\tau) \rangle d\tau} \quad (C.7)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{\int \tau^2 \langle E_x^2(\tau) \rangle d\tau}{\int \langle E_x^2(\tau) \rangle d\tau} \quad (C.8)$$

The expected value operator in the above equations is with respect to a uniform and random sampling of the I/O-SOPs.

The PMD_{RMS} value that is reported is:

$$PMD_{RMS} = \left[\frac{3}{2} (\sigma_x^2 - \sigma_0^2) \right]^{1/2} \quad (C.9)$$

Equation (C.9) relates to Equation (2) as follows [11]:

$$\frac{\int \Delta\tau^2(\nu) S_0^2(\nu) d\nu}{\int S_0^2(\nu) d\nu} = \frac{3}{2} (\sigma_x^2 - \sigma_0^2) \quad (C.10)$$

Using the ideal definitions of the RMS width terms from Equations (C.7) and (C.8), Equation (C.10) is exact for any DGD curve present at the time of measurement and any source spectral characteristic. The left side of Equation (C.10) is a spectrally weighted (by squared power) RMS calculation.

Using the assumption of ergodic conditions:

$$\langle \Delta\tau^2 \rangle = \left\langle \frac{\int \Delta\tau^2(\nu) S_0^2(\nu) d\nu}{\int S_0^2(\nu) d\nu} \right\rangle \quad (C.11)$$

Annex D (informative)

Stokes parameter evaluation method using back-reflected light

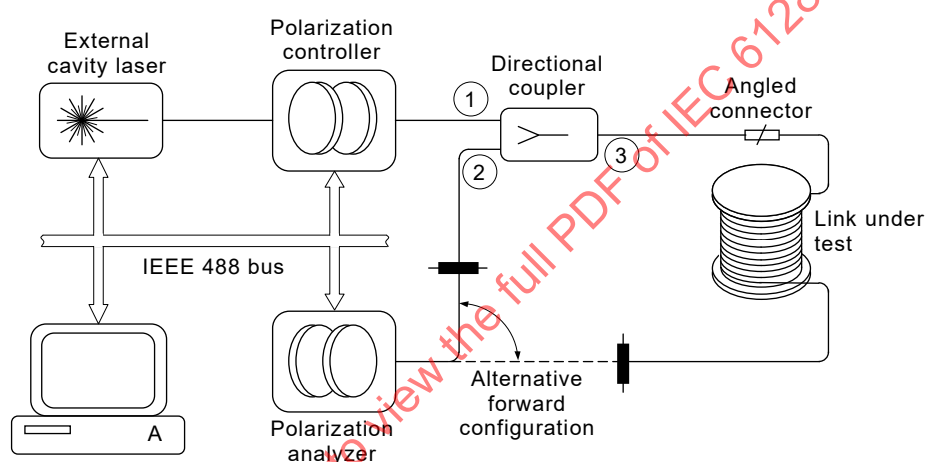
D.1 Utility

The method in this annex has been shown to yield suitable results for links up to 40 km – without amplifiers [12].

D.2 Apparatus

D.2.1 Block diagram

Figure D.1 shows a layout of the apparatus.



IEC

Figure D.1 – Layout for Method D

Most of the elements of the apparatus are the same as for Method B. The following describes the other elements.

D.2.2 Directional coupler

The directional coupler couples the source light into the link and the light that is reflected from the far end of the link into the polarization analyzer. This coupler shall have low PMD (0,1 ps), low PDL (0,1 dB), and low return loss (better than 50 dB) and should be kept stable during the measurement.

D.2.3 Angled connector

This connector shall have return loss of better than 50 dB to avoid mixed signals at the polarization analyzer. The patchcord between the coupler and the angled connector should be kept stable during the measurement.

D.2.4 Far-end termination

The far end of the link shall reflect sufficient light to the polarimeter to detect the output SOPs. A smooth end-cut that is perpendicular to the axis of the fibre may need to be prepared.

D.3 Procedure

The procedure for Method D is the same as for Method B – except that the input end of the link is both input and output for the measurement equipment. In addition, the angled connector at the input end of the link and reflecting end at the output end of the link need special preparation.

D.4 Calculation and interpretation of results

The calculation of DGD at a given wavelength is the same as for Method B. The difference is that the average of these DGD values is not the PMD of the link. Define $\langle \Delta\tau_B \rangle$ as the average of the back-reflected DGD measurements. The PMD (ps) of the link for the wavelength region measured is then given as:

$$PMD = \frac{2}{\pi} \langle \Delta\tau_B \rangle \quad (D.1)$$

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61280-4-4:2017

Annex E (informative)

Modulation phase-shift method

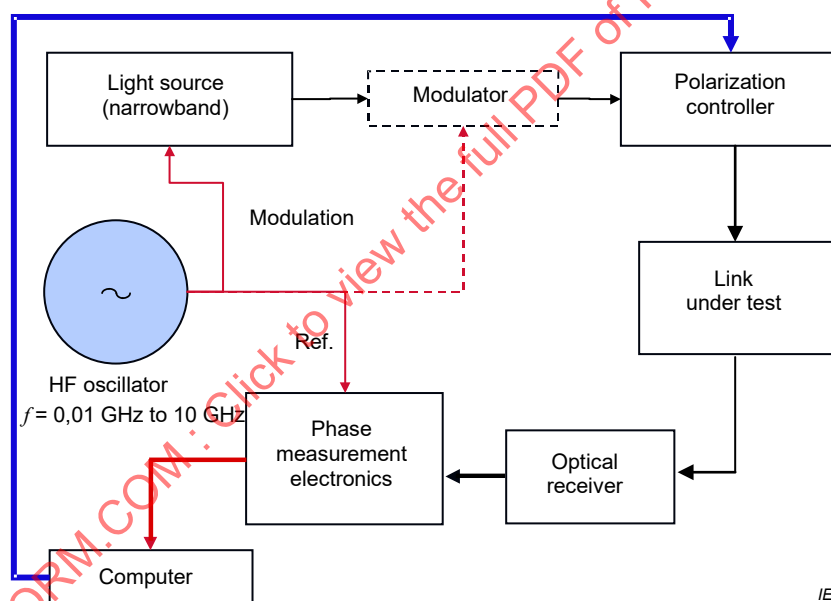
E.1 Apparatus

E.1.1 Overview and block diagrams

Two primary techniques are available:

- one based on a full search of input SOPs;
- one based on the measurement of the output SOPs associated with a Mueller set of input SOPs.

The full search technique can be implemented with either a simple polarization controller or with a polarization modulator in combination with the controller. Figure E.1 shows a layout for the simple controller, along with alternative connections for controlling the phase reference path. Figure E.2 shows a layout for the polarization modulation case. The apparatus in Figure E.1 is sufficient to complete the Mueller set technique.



IEC

Figure E.1 – Basic apparatus

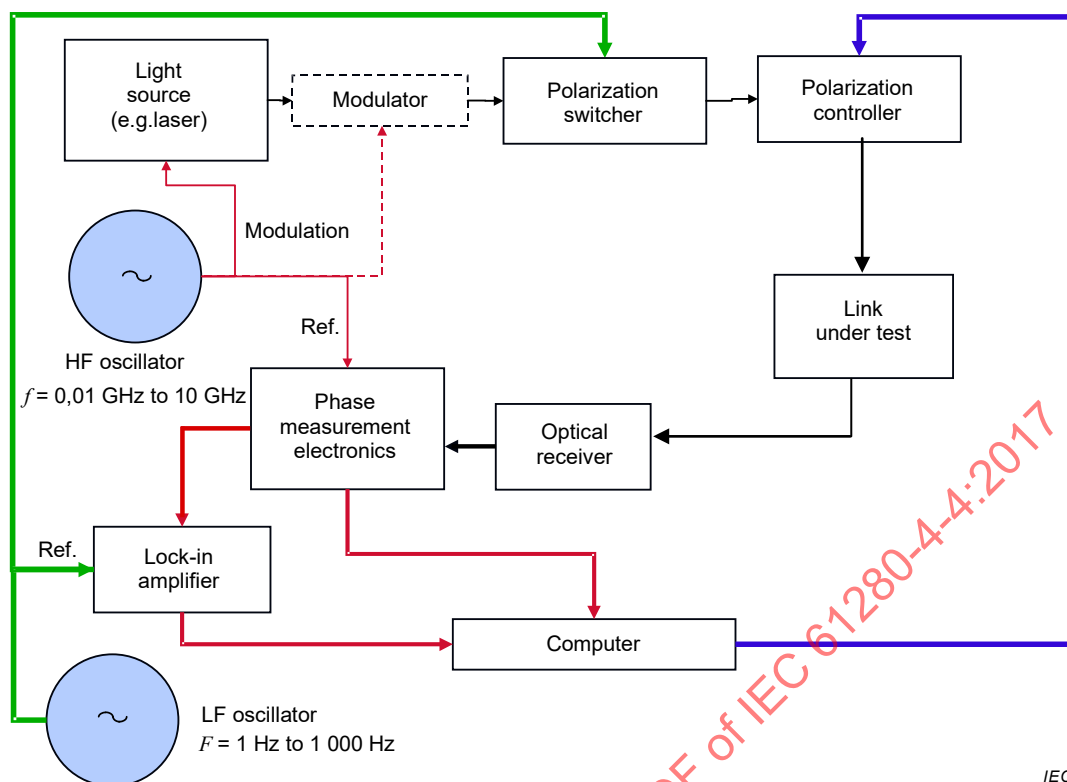


Figure E.2 – Apparatus layout for polarization modulation

E.1.2 Light source(s)

E.1.2.1 General

For the measurement of DGD at each specified wavelength, use multiple laser diodes, tuneable lasers or light-emitting diodes filtered by monochromator or other filter(s). For a "start-stop-measure" wavelength test system, a key issue involved in the selection of the test set is to first determine the required measurement step size based on the DUT spectrum and then to select the source linewidth in accordance with the Nyquist criterion, based on that step size

E.1.2.2 Laser diodes

The laser source spectrum including the centre wavelength and modulated output phase shall be stable over the measurement time period at the bias current, modulation frequency and diode temperature encountered.

Single-longitudinal-mode laser diodes with temperature control and output power stabilization (for example PIN feedback) are typically suitable for use with single-mode optical fibre (SMF).

E.1.2.3 Filtered light emitting diodes

Use one or more light emitting diodes (LED). The LED spectrum, including the centre wavelength and modulation output phase, shall be stable over the measurement time period at the bias current, modulation frequency and LED temperature encountered.

Filter the LED optical spectrum to give a FWHM linewidth in the range 1 nm to 5 nm. A monochromator can be used for filtering or selecting the wavelength.

E.1.2.4 Tuneable diode lasers

Use one or more tuneable diode lasers. The laser spectrum, including the centre wavelength and modulated output phase of each laser at each wavelength used, shall be stable over the

measurement time period at the bias current, modulation frequency and diode temperature encountered. Typically completely self-contained temperature-controlled external-cavity laser units can be employed.

E.1.3 Modulation

Modulate the intensity of the light sources to produce a waveform with a single dominant Fourier component. The frequency of the modulation shall be sufficiently high and sufficiently stable to ensure adequate measurement precision.

Modulation can be achieved by direct (internal) current injection to the laser diode or LED. Other (external) forms of modulation means can also be used. Examples are electro-optic modulator devices placed after the laser (see Figure E.1) to modulate the light before it is passed into the link. The modulator shall be sufficiently stable to ensure adequate measurement precision.

A sinusoidal, trapezoidal or square wave modulation is acceptable. A frequency stability of 0,01 ppm is typically sufficient.

It is essential to prevent ambiguities of $2\pi n$ radians (n , an integer) in measuring the phase shift. This can be done by means such as reducing the modulator frequency for large PMD coefficients.

For example, the modulation frequency shall be chosen lower than the frequency that gives a differential phase shift of 2π . This limiting frequency can be estimated as:

$$f_{\max} = \frac{10^3}{DGD_{\max}} \text{ GHz} \quad (\text{E.1})$$

where $DGD_{\max}$ is the maximum expected typical DGD value, in ps.

In fact, for typical DGD values of <100 ps, $f_{\max} >10$ GHz generally exceeds the maximum practical frequencies that can be generated or used.

The modulation at frequency, f , will impart sidebands at $\pm f$ away from the centre wavelength of the source; and in some very narrowband links, this might prove a limitation. To ensure accurate phase measurement, the total occupied bandwidth, including the sidebands of the modulation and the source linewidth itself, shall be less than or equal to the link bandwidth. f is typically chosen as that frequency convenient to phase detection electronics, within any limitations posed by the device bandwidth. f is typically in the range of 10 MHz to 10 GHz.

The RMS repeatability of the DGD measurement, defined here as $DGD_{\min}$, defines a minimum modulation frequency $f_{\min}$ that shall be used. Determine $f_{\min}$ by the phase resolution $\delta\phi$ of the phase detector:

$$f_{\min} = \frac{\delta\phi \times 10^3}{2\pi \times DGD_{\min}} \text{ GHz} \quad (\text{E.2})$$

where

$DGD_{\min}$ is the RMS DGD repeatability value (ps);

$\delta\phi$ is RMS phase resolution of the phase detector.

E.1.4 Polarization control

The input SOP to the DUT is controlled using a polarization controller. The SOP is selected by means of a control signal from the computer. The computer will select appropriate, known and distinct SOPs, such as orthogonal SOPs, and measure differential delays between these SOPs accordingly.

The polarization controller is used to provide polarized light of a set of SOPs at the input of the DUT. If the light source(s) are not already polarized, the polarization controller shall contain a polarizer at its input. The SOP is controlled by variable birefringent elements following the polarizer. Examples of polarization controllers are liquid crystal retardation plates, loops of birefringent fibre that are mechanically moved, and electro-optic crystal devices, among others.

E.1.5 Input and output optics

Couple the light source output to the link input, and the link output to the detection system input, in a way that ensures that the physical and optical path lengths for each source are constant during the measurement time (this ensures that the differential phase between SOPs does not change because of any change in either path length). Suitable coupling devices can include multichannel single-mode optical switches or demountable optical connectors, but more typically, fusion splices are used. These devices shall be carefully selected in accordance with their lowest possible intrinsic maximum DGD, PDL and group delay over the measurement wavelength range. For calibration fibre measurements, replace "link" with "calibration fibre".

All fibre leads, pigtails and other optical components in the optical path beyond the polarization controller shall exhibit minimal intrinsic maximum DGD, PDL and group delay over the measurement wavelength range. These factors will contribute additional uncertainty in the determination of the DGD of the link.

SOP selection is typically made under computer control, and measurement of the relative phase at the SOPs shall be sufficiently rapid so that the result is not adversely affected by the thermal drift of the delay in the fibre leads.

Scanning the launched SOPs allows the DGD to be determined as the maximum differential phase. The phase detection/computer systems can be implemented in several ways, two examples of which are given below.

In the first example, shown in Figure E.1, the phase detector/computer records the phase at the first test SOP. The polarization controller is set to another SOP. The phase is then recorded at this later SOP. The DGD at the selected wavelength is determined from the maximum difference of the two-phase readings.

In the second example, shown in Figure E.2, a polarization switcher is used to modulate the light SOP at the input to the polarization controller. The polarization switcher can consist of rotating birefringent elements, an electro-optic or photo-elastic modulator, or other elements. The polarization is alternated between two distinct SOPs such as orthogonal at a frequency, F , of several tens of Hz, allowing lock-in detection of a true differential phase output from the phase detector (see E.1.6). This "polarization modulation" allows efficient removal of thermal drift effects. The phase detector produces an AC signal, synchronous with the SOP modulation, with amplitude proportional to the differential phase between the two SOPs. This signal is subsequently demodulated by a lock-in amplifier to produce a DC signal representing the differential phase. The DGD at the selected wavelength is determined from the maximum differential phase from a scan of the launch SOPs over the Poincaré sphere.

E.1.6 Optical detector and phase detection electronics

Use an optical detector that is sensitive over the range of wavelengths to be measured, in conjunction with a phase detector. An amplifier can be used to increase the detection system sensitivity. A typical system might include a PIN photodiode, FET amplifier, and a phase sensitive detector or vector voltmeter.

Optical means, such as a variable optical attenuator or fibre amplifier, can be provided to control the received optical power. The devices are placed in line immediately prior to the detector/receiver. These devices shall be selected carefully in accordance with their lowest possible intrinsic maximum DGD, PDL and group delay over the measurement wavelength range.

The detector-amplifier-phase detection system shall respond only to the fundamental Fourier component of the modulating signal and shall introduce a signal phase shift that is constant over the range of received optical powers encountered.

The phase detection unit/computer will record the phase produced by each SOP and provide an output representing the differential phase/delay between the two SOPs.

E.1.7 Reference signal

Provide the phase detector with a reference signal with the same fundamental Fourier component as the modulating signal against which to measure the differential phases of the signal sources. The reference signal shall be synchronized to the modulating signal and can be derived from the modulating signal.

Examples of reference signals are as follows.

- Where the signal sources and detector are co-located, such as during calibration, an electrical connection can be used between the signal generator and the reference port of the phase detector unit.
- An optical splitter with a detector, inserted before the test specimen, can also be used for co-located equipment. The detector output is amplified, and this signal is used as the reference signal for the phase detector unit.
- The optical modulator at the input can alternatively be controlled from the output end by a separate channel where the electrical modulator is co-located with the phase detection electronics.

E.2 Procedure

E.2.1 Modulation frequency

Set the modulation frequency according to the expected $DGD_{\max}$ and $DGD_{\min}$ values (see Clause E.1).

E.2.2 Scan the wavelengths and measure DGD

E.2.2.1 Overview

For each technique, there is a method of obtaining the DGD at a particular wavelength. Scan the source across the desired wavelength range and, for each wavelength, measure the DGD as described below.

At the completion of the wavelength scan, the link PMD value is calculated as the average of the DGD values.

E.2.2.2 Full search procedure

For any pair of orthogonal input SOPs, there will be a phase shift difference for a given wavelength. In the context of this measurement, the DGD at the wavelength is derived from the maximum phase shift for any pair of orthogonal input SOPs. The SOP of the pair at which this maximum occurs is known as the PSP.

In general, the orientation of the PSPs of the link will not be known in relation to the polarization axes of the analyzer of the test apparatus. Also, the link PSPs vary with time and wavelength. Other than the uncertainty associated with finding these axes, the main source of uncertainty is the leads within the apparatus itself.

There are several strategies for determining the correct DGD between the PSPs when the PSPs themselves are arbitrary, as described above. In the SOP search methods, a source of uncertainty is the alignment error of the input SOPs with the true principal axes. For example, a 5-degree alignment error will give rise to a 0,4 % uncertainty in the DGD value. Ensure the polarization search alignment error is well controlled.

Examples of suitable implementations are as follows.

- Use the polarization controller in a “search-and-measure” fashion for each test wavelength. Various search algorithms can be adopted to optimize measurement speed. At a given wavelength, use the polarization controller to scan the launch SOP, recording the phase shift for each SOP. Once sufficient SOPs are covered, the maximum and minimum of the recorded phase shifts will correspond to light launched into the PSPs of the link. The DGD at the current wavelength is then proportional to the difference between the maximum and minimum phase shift (see Clause E.3 for the calculation). This difference is referred to as the differential phase shift. The lead birefringence will act on these SOPs in such a way that the net input SOP to the link itself will be aligned to its two PSPs or principal axes. Once the maximum and minimum phases have been detected, the true DGD at this wavelength is the difference in delay between these two SOPs.
- In the case of polarization modulation (Figure E.2), the “search-and-measure” method can be adapted, so that as the polarization controller is scanned, the differential phase shift can be detected directly. This simplifies the search to looking for the maximum differential phase shift, which is proportional to the DGD by the relationship of Equation (E.3).

Designate the maximum phase shift difference for the wavelength as:

$$\Delta\phi_{\max}(\lambda) = \max_i |\Delta\phi_i(\lambda) - \Delta\phi'_i(\lambda)| \quad (\text{E.3})$$

where

i is the index and represents the various input SOPs;

$\Delta\phi, \Delta\phi'$ are the phase shifts of the input SOPs.

E.2.2.3 Mueller set analysis

A Mueller set of input SOPs is most easily described on the Poincaré sphere, as shown in Figure E.3.

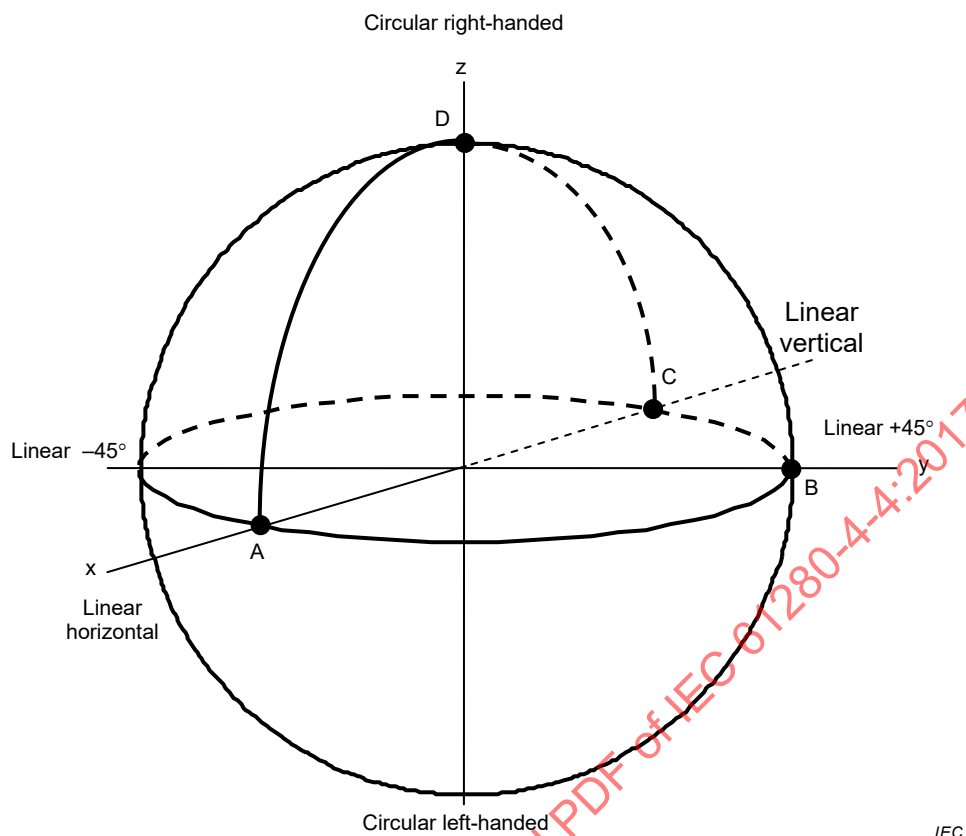


Figure E.3 – Mueller states on Poincaré sphere

SOPs that are orthogonal are 180° apart on the Poincaré sphere. Three of the SOPs are on a great circle of the sphere and are inter-mutually separated by 90° , as illustrated in Figure E.3. Using the right hand rule relative to the “north pole”, starting at an arbitrary point, A, on the great circle, positions B and C follow by successively adding 90° . Position D is orthogonal to the other points and oriented “up” using the right hand rule. The following Equation (E.4) describes the normalized input Stokes vector, s_0 , the parameters of which are used to define an example of a Mueller set where the great circle is on the equator (see Table E.1). The parameter, θ , is the linear orientation of the associated normalized Jones vector, j_0 . The parameter, μ , is the phase difference of the x and y elements of that vector.

$$s_0 = \begin{bmatrix} \cos 2\theta \\ \sin 2\theta \cos \mu \\ \sin 2\theta \sin \mu \end{bmatrix} \quad j_0 = \begin{bmatrix} \cos \theta \exp[-i\mu/2] \\ \sin \theta \exp[i\mu/2] \end{bmatrix} \quad (\text{E.4})$$

Table E.1 – Example of Mueller set

Position	θ	μ	Description
A	0	0	Linear polarization at 0° (horizontal)
B	$\pi/4$	0	Linear polarization at 45° (45°)
C	$\pi/2$	0	Linear polarization at 90° (vertical)
D	$\pi/4$	$\pi/2$	Circular polarization (spherical)

For each wavelength, cycle the polarization controller through positions A, B, C, and D. For each position, measure the phase shifts (radians), designated, $\Delta\phi_A(\lambda)$, $\Delta\phi_B(\lambda)$, $\Delta\phi_C(\lambda)$, $\Delta\phi_D(\lambda)$, respectively. Calculations using these quantities are given in E.3.

E.2.3 Calibration

Periodically (for example daily or weekly), bring the measurement apparatus together to one location, insert a phase calibration fibre, a two-meter section of low PMD single-mode fibre, into the apparatus and establish a reference signal. For each test wavelength required, repeat the measurement procedure. If it is found that the averaged differential phase is negligible, the contribution associated with the leads and pigtails is also negligible.

E.3 Calculations

E.3.1 DGD calculations

E.3.1.1 Results overview

Both DGD calculation techniques can result in a series of DGD values versus wavelength. Figure E.4 shows an example of such a function. Alternatively, the DGD values can be displayed in a histogram format shown in Figure E.5.

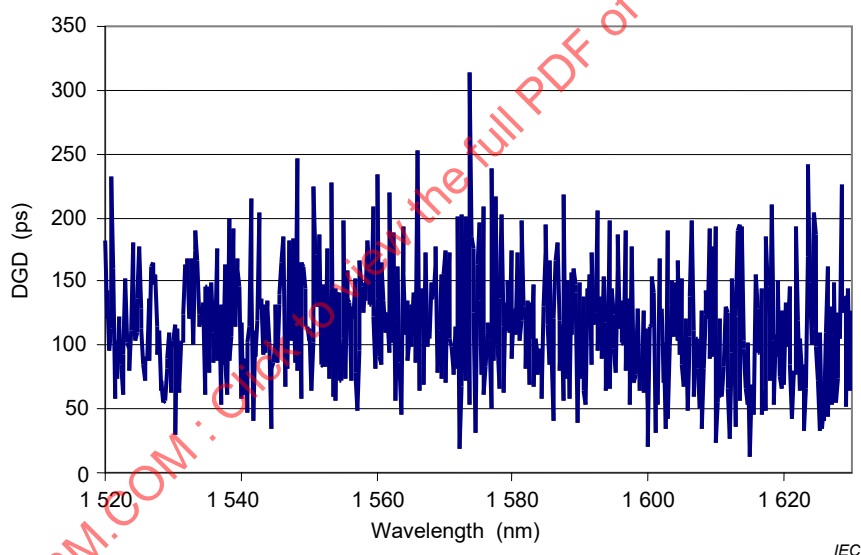


Figure E.4 – DGD versus wavelength

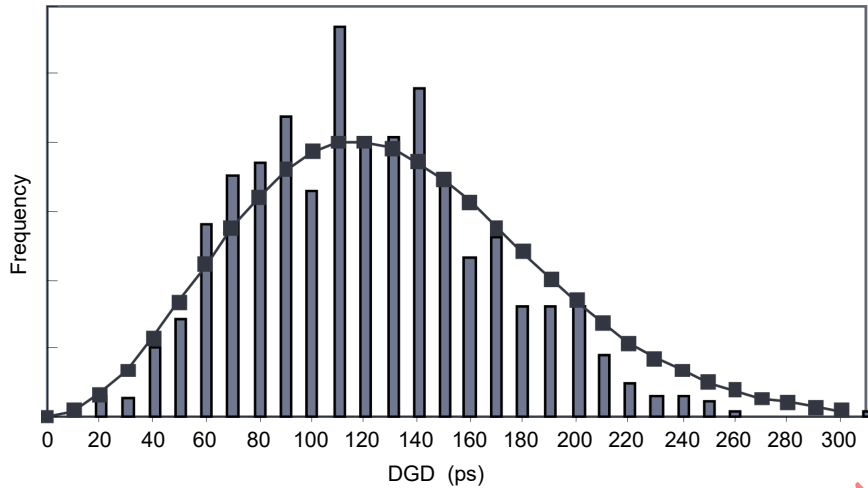


Figure E.5 – DGD in histogram format

E.3.1.2 DGD calculation using full scan technique

Calculate the DGD value (ps), at each wavelength, λ (nm), from the maximum phase difference, $\Delta\phi_{\text{Max}}(\lambda)$ (rad) (see E.2.2.2), and modulation frequency, f , (GHz) as:

$$DGD(\lambda) = \frac{10^3}{2\pi} \frac{\Delta\phi_{\text{Max}}(\lambda)}{f} \quad (\text{E.5})$$

E.3.1.3 DGD calculation using Mueller set technique

Using the notation of E.2.2.3, calculate the average phase of the two PSPs, $\phi_{\text{RF}}(\lambda)$, as:

$$\phi_{\text{RF}}(\lambda) = \frac{\Delta\phi_{\text{A}}(\lambda) + \Delta\phi_{\text{C}}(\lambda)}{2} \quad (\text{E.6})$$

Adjust the measured phase values by the average phase as:

$$\begin{aligned} \phi_{\text{RF,A}}(\lambda) &= \Delta\phi_{\text{A}}(\lambda) - \phi_{\text{RF}}(\lambda) \\ \phi_{\text{RF,B}}(\lambda) &= \Delta\phi_{\text{B}}(\lambda) - \phi_{\text{RF}}(\lambda) \end{aligned} \quad (\text{E.7})$$

$$\phi_{\text{RF,D}}(\lambda) = \Delta\phi_{\text{D}}(\lambda) - \phi_{\text{RF}}(\lambda)$$

Calculate the phase difference, $\delta_{\text{RF}}(\lambda)$, as:

$$\delta_{\text{RF}}(\lambda) = 2 \arctan \left\{ \left[\tan^2(\phi_{\text{RF,A}}(\lambda)) + \tan^2(\phi_{\text{RF,B}}(\lambda)) + \tan^2(\phi_{\text{RF,D}}(\lambda)) \right]^{1/2} \right\} \quad (\text{E.8})$$

The DGD (ps) is calculated using $\delta_{\text{RF}}(\lambda)$ (radians) and the modulation frequency, f , (GHz) as:

$$DGD(\lambda) = 10^3 \frac{\delta_{\text{RF}}(\lambda)}{2\pi f} \quad (\text{E.9})$$

E.3.2 PMD calculation

The PMD value (ps) for a wavelength range is the average of the DGD values for the range.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61280-4-4:2017

Annex F (informative)

Polarization phase shift method

F.1 Apparatus

F.1.1 Block diagram

The primary technique of the PPS method is given. Figure F.1 shows a block diagram of the PPS method.

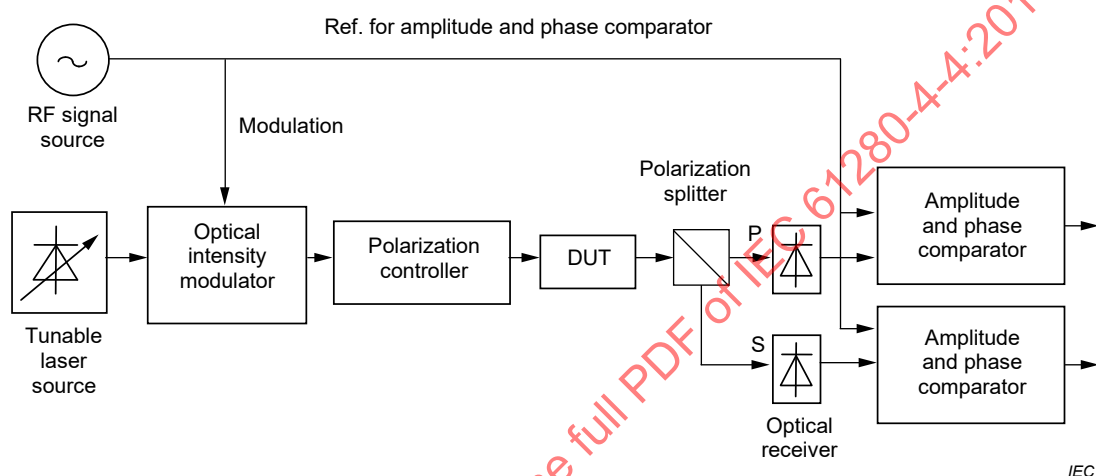


Figure F.1 – Block diagram for Method F (polarization phase shift method)

F.1.2 Light source

A tuneable laser source is used as the light source. The tuning range of the laser shall be sufficient to cover the required PMD wavelength range. The completely self-contained temperature controlled and current controlled external-cavity laser unit is generally employed.

F.1.3 Modulation

F.1.3.1 RF signal source

The RF signal source provides a modulating signal for the optical intensity modulator. Some of the modulating signal is sent to the amplitude and phase comparator as a reference signal. The RF signal source requires a broadband characteristic because it is necessary to provide a sinusoidal modulating signal whose frequency range is typically from 50 MHz to 3 GHz. In the selection of the modulation frequency, undesirable influences of modulation sidebands and the DGD measurement resolution should be considered.

The sidebands are generated on both sides of the optical signal with a frequency difference of f , which is the modulation frequency. This represents the light spectrum spread. The effective wavelength resolution, $\Delta\lambda$ (nm), is restricted by the sideband, and is generally given as:

$$\Delta\lambda = 2 \times \frac{\lambda^2 \times f}{c} \quad (\text{F.1})$$

where

λ is the wavelength (nm);

f is the modulation frequency (GHz);
 c is the velocity of light in vacuum (m/s).

In addition, the DGD measurement resolution, ΔDGD (ps), is also restricted by the modulation frequency, f , and is typically given as:

$$\Delta DGD = \frac{\Delta\phi \times 10^3}{360 \times f} \quad (\text{F.2})$$

where

$\Delta\phi$ is the phase resolution of the phase comparator (degree);

f is the modulation frequency (GHz).

The total phase accuracy including the frequency stability of the RF signal source is required to be $\pm 0,3^\circ$ or less to ensure adequate measurement precision.

F.1.3.2 Optical intensity modulator

The optical intensity modulator receives modulating signals from the RF signal source and modulates the intensity of output light from the tuneable laser source. A LiNbO₃ modulator is typically employed.

F.1.4 Polarization control

The polarization controller is used to deliver polarized light of specific SOPs to the DUT. The polarization controller consists of three components: a polarizer, a quarter waveplate, and a half waveplate. Rotating the set of two retardation plates can generate any SOP. The polarization controller needs excellent characteristics to provide expected measurement precision. The angle adjustment resolution is required to be $\pm 0,1^\circ$. The polarization extinction ratio is typically required to be 30 dB or more over expected wavelength range.

NOTE One limitation of the method is based on the fact that quarter and half waveplates are generally not spectrally flat.

F.1.5 Output optics

The output from the DUT is coupled into a polarization splitter before the optical detectors. The polarization splitter separates the output from the DUT into two polarized waves, P- and S-polarized light. The polarization splitter consists of a non-isotropic crystal such as a calcite prism and generally possesses a high polarization extinction ratio and very low DGD, group delay and PDL characteristics. The characteristic of the available wavelength range is typically very wide.

F.1.6 Optical detectors

The optical detector converts the modulated light from the DUT into an electrical signal. A PIN photodiode with a good linearity is generally used. The PIN photodiode shall have bandpass characteristics sufficient enough to respond to the modulation frequency of the RF signal source. In addition, to ensure a high signal to noise ratio, a broadband amplifier should be used in the stage after the detector.

F.1.7 Amplitude and phase comparator

The amplitude and phase comparator measures amplitude and phase by comparing the signals for each polarized wave component with the reference modulating signal from the RF signal source. The group delay, τ (ps), is calculated from the phase using the following expression:

$$\tau = \frac{\phi \times 10^3}{360 \times f} \quad (\text{F.3})$$

where

ϕ is the phase (degree);

f is the modulation frequency (GHz).

F.1.8 Reference signal

The reference signal, which is part of the modulating signal from the RF signal source, is provided to the amplitude and phase comparator. The reference signal shall be synchronized to the modulating signal.

F.2 Procedure

F.2.1 Modulation frequency

The choice of modulation frequency is based on the wavelength resolution, $\Delta\lambda$, required for the measurement results and the DGD measurement resolution, ΔDGD . For more information, refer to F.1.3.1.

F.2.2 Wavelength increment

Two wavelengths are required to obtain a DGD value, because the wavelength differentiation in this wavelength increment, $\delta\lambda$, is used when calculating a DGD. This wavelength increment, $\delta\lambda$, will be called wavelength step size, and the procedure for the determination of $\delta\lambda$ is explained. When the wavelength of the tuneable laser source is changed by the $\delta\lambda$, $\delta\lambda = (\lambda + \delta\lambda) - \lambda$, the polarization angle change of the output SOP from the DUT becomes less than 45° . The $\delta\lambda$ (nm) is usually expressed as:

$$\delta\lambda \leq \frac{\lambda^2 \times 10^3}{4 \cdot c \times \Delta\tau_{\max}} \quad (\text{F.4})$$

where

λ is the wavelength of the measured range (nm);

c is the velocity of light in vacuum (m/s);

$\Delta\tau_{\max}$ is the maximum anticipated DGD value of the DUT (ps).

For example, the product of maximum DGD value, $\Delta\tau_{\max}$, and wavelength step size, $\delta\lambda$, shall remain less than 2 ps × nm at 1 550 nm.

The calculations are all conducted with the radian frequency increment, $\Delta\omega = \frac{2\pi\delta\lambda}{\lambda(\lambda + \delta\lambda)}$, which varies with actual wavelength over a range, so measurements made with an equal frequency increment can be used, provided the equivalent expression of Equation (F.4) is met.

F.2.3 Scanning wavelengths and measuring DGDs

The tuneable laser source is used to perform wavelength per wavelength measurement over the desired wavelength range, and the DGD value is calculated at each pair of adjacent wavelengths. The PMD value of the DUT can be calculated after an average DGD has been calculated based on the DGD values previously obtained along the measured wavelength range.

For a given wavelength, this method uses a pair of orthogonal polarized input waves (the 0° and 90° linearly polarized waves). The 0° and 90° linearly polarized waves are launched into the DUT, and the output is separated into two polarized wave components by the polarization splitter. The power and phase for each of the polarized waves (the P- and S- polarized light) at a specific measurement wavelength are measured.

For the 0° input SOP, the output powers and phases are measured for the P and S paths. These are designated as $|T_{11}|^2(k)_{\text{mea}}$ and $\phi_{11}(k)_{\text{mea}}$ for the P output path and $|T_{21}|^2(k)_{\text{mea}}$ and $\phi_{21}(k)_{\text{mea}}$ for the S output path. For the 90° input SOP, power and phase measurements for the two output paths are designated with the same symbols, but with the second subscripts changed from 1 to 2. (The “mea” part of the subscripts is used to distinguish these values from values used in the calibration process.) Given these measured values for a sequence of optical frequencies indexed with k , the first order frequency phase derivatives are calculated according to Equation (F.5).

$$\frac{\Delta\Phi_{ij}(k)_{\text{mea}}}{\Delta\omega} = \frac{\Phi_{ij}(k+1)_{\text{mea}} - \Phi_{ij}(k)_{\text{mea}}}{\Delta\omega} \quad (\text{F.5})$$

F.2.4 Calibration

A calibration is performed on a low PMD single-mode fibre whose length is 1 m or less before DUT measurement. The phase and power for the two input polarization are measured at both P- and S- detectors for the same wavelengths that will be used in the measurement of the link. The first order phase derivative is also calculated for each pair of adjacent wavelengths. These results follow the same notation as F.2.3, but are subscripted with “cal”.

The results for each pair of measurement wavelengths are adjusted by the calibration results as:

$$|T_{jl}|^2(k) = \frac{|T_{jl}|^2(k)_{\text{mea}}}{|T_{11}|^2(k)_{\text{cal}}} \quad \frac{\Delta\Phi_{jl}(k)}{\Delta\omega} = \frac{\Delta\Phi_{jl}(k)_{\text{mea}}}{\Delta\omega} - \frac{\Delta\Phi_{11}(k)_{\text{cal}}}{\Delta\omega} \quad jl = 11 \text{ and } 12 \quad (\text{F.6})$$

$$|T_{mn}|^2(k) = \frac{|T_{mn}|^2(k)_{\text{mea}}}{|T_{22}|^2(k)_{\text{cal}}} \quad \frac{\Delta\Phi_{mn}(k)}{\Delta\omega} = \frac{\Delta\Phi_{mn}(k)_{\text{mea}}}{\Delta\omega} - \frac{\Delta\Phi_{22}(k)_{\text{cal}}}{\Delta\omega} \quad mn = 21 \text{ and } 22 \quad (\text{F.7})$$

F.3 Calculations

F.3.1 Results overview

The calculation technique can result in a series DGD values versus wavelength. Figure F.2 shows an example of such characteristics, similar to a link application.

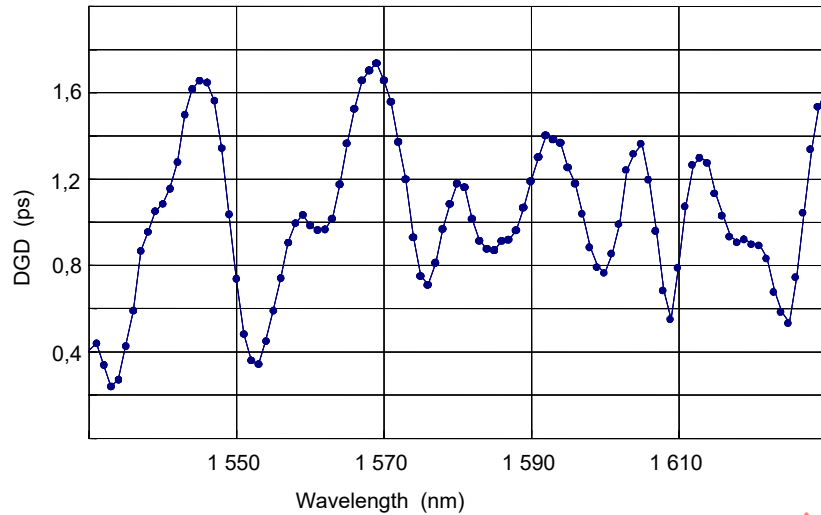


Figure F.2 – DGD versus wavelength for a random mode coupling device

F.3.2 DGD determination

The following parameters are calculated using measured values in F.2.3 and F.2.4 for each pair of wavelengths, indexed with k and $k + 1$:

$$\begin{aligned}\bar{\alpha}_1 &= \frac{\Delta\theta}{\Delta\omega} = \frac{\theta(k+1) - \theta(k)}{\Delta\omega} \\ \bar{\beta}_1 &= \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta\Phi_{11}}{\Delta\omega} - \frac{\Delta\Phi_{22}}{\Delta\omega} - \frac{\Delta\Phi_{21}}{\Delta\omega} + \frac{\Delta\Phi_{12}}{\Delta\omega} \right) \\ \bar{\gamma}_1 &= \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta\Phi_{11}}{\Delta\omega} - \frac{\Delta\Phi_{22}}{\Delta\omega} + \frac{\Delta\Phi_{21}}{\Delta\omega} - \frac{\Delta\Phi_{12}}{\Delta\omega} \right)\end{aligned}\quad (\text{F.8})$$

$$\begin{aligned}\theta(k) &= \frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\frac{|T_{11}|^2 - |T_{21}|^2}{|T_{11}|^2 + |T_{21}|^2} \right) \\ \cos 2\theta(k) &= \frac{|T_{11}|^2 - |T_{21}|^2}{|T_{11}|^2 + |T_{21}|^2}\end{aligned}$$

$$\theta(k) = \frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\frac{|T_{11}|^2(k) - |T_{21}|^2(k)}{|T_{11}|^2(k) + |T_{21}|^2(k)} \right) \quad (\text{F.9})$$

$$\alpha(k) = \frac{\theta(k+1) - \theta(k)}{\Delta\omega} \quad (\text{F.10})$$

$$\beta(k) = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta\Phi_{11}(k)}{\Delta\omega} - \frac{\Delta\Phi_{22}(k)}{\Delta\omega} - \frac{\Delta\Phi_{21}(k)}{\Delta\omega} + \frac{\Delta\Phi_{12}(k)}{\Delta\omega} \right) \quad (\text{F.11})$$

$$\gamma(k) = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta\Phi_{11}(k)}{\Delta\omega} - \frac{\Delta\Phi_{22}(k)}{\Delta\omega} + \frac{\Delta\Phi_{21}(k)}{\Delta\omega} - \frac{\Delta\Phi_{12}(k)}{\Delta\omega} \right) \quad (\text{F.12})$$

The DGD value for each wavelength is calculated as:

$$DGD(k) = 2\sqrt{\alpha(k)^2 + \beta(k)^2 + \gamma(k)^2 + 2\beta(k)\gamma(k)\cos(2\theta(k))} \quad (\text{F.13})$$

F.3.3 PMD calculation

The PMD value within the measured wavelength range is given by the DGD average value over the measured wavelength range (PMD_{average}).

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61280-4-4:2017

Annex G (normative)

Wavelength scanning OTDR and SOP analysis (WSOSA) PMD test method

G.1 General

The WSOSA principle is based on measuring the power reflected from the far end of the link under test. Each datum is determined by recording this reflected power at two closely spaced frequencies, $\nu - \delta\nu/2$ and $\nu + \delta\nu/2$, for two nominally orthogonal polarizations, x and y , so that four power measurements are made as follows:

$$P_x\left(\nu - \frac{\delta\nu}{2}\right), P_x\left(\nu + \frac{\delta\nu}{2}\right), P_y\left(\nu - \frac{\delta\nu}{2}\right), P_y\left(\nu + \frac{\delta\nu}{2}\right) \quad (\text{G.1})$$

where

ν is the centre frequency of the pair $\nu - \delta\nu/2$ and $\nu + \delta\nu/2$;

$\delta\nu$ is the frequency spacing between both frequencies of the pair.

NOTE In the procedure, these four measurements are actually repeated, resulting in another four independent power measurements that are distinguished by marking them with a prime mark.

Figure G.1 illustrates the definitions of a frequency pair, its centre frequency and the frequency spacing.

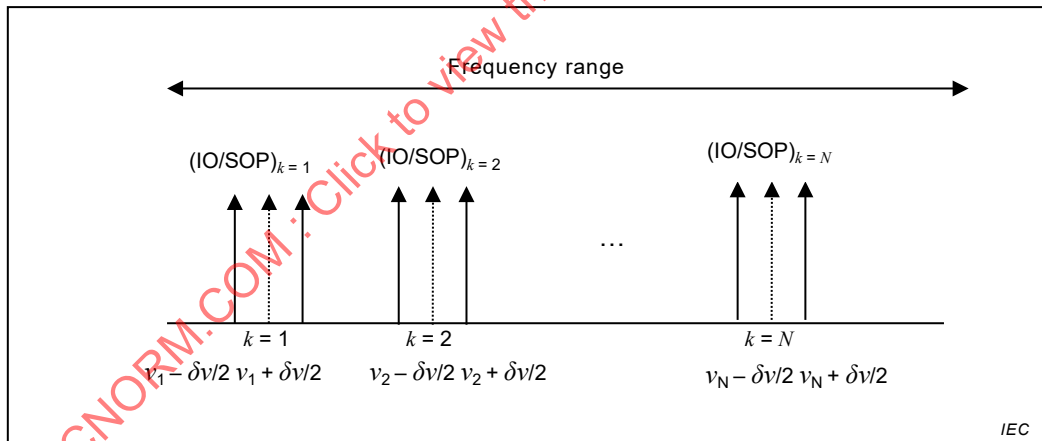


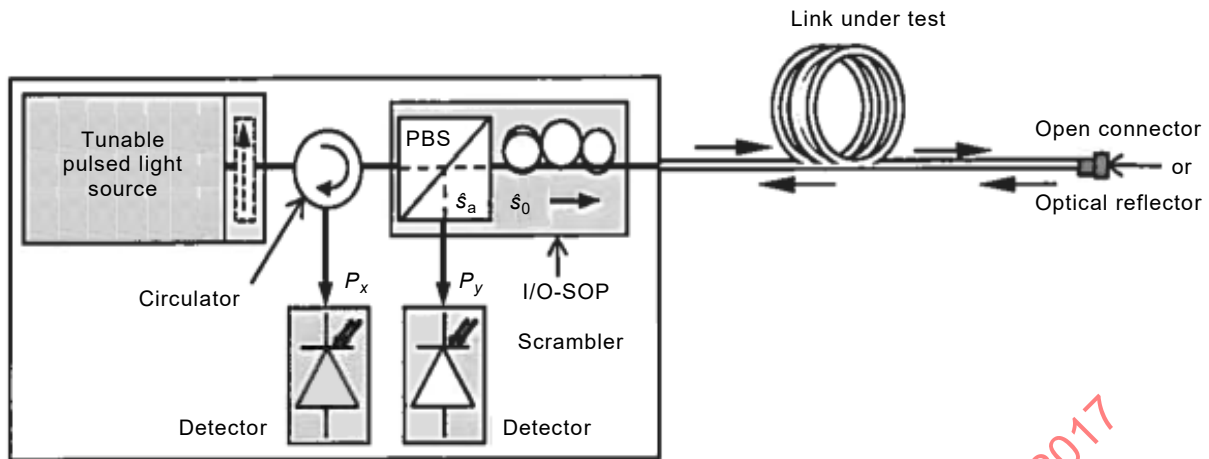
Figure G.1 – Illustration of the frequency domain and parameters for WSOSA

For each pair of frequencies, a random input-output state of polarization (I/O-SOP) is selected. The random I/O-SOPs are selected so each frequency pair is independent of all the other frequency pairs and so the full Poincaré sphere is uniformly covered.

G.2 Apparatus

G.2.1 Block diagram

Figure G.2 shows a schematic of WSOSA generic experimental implementation.



IEC

Figure G.2 – Typical generic experimental implementation for WSOSA

Other implementations are possible, such as replacing the polarization beam splitter (PBS) with a polarizer and coupler or by replacing the PBS with a polarizer and eliminating the detector corresponding to P_y altogether.

The parameters used in Figure G.2 and throughout the document are:

P_x , the optical power transmitted on the x side of the PBS,

P_y , the optical power transmitted on the y side of the PBS.

G.2.2 Light source

The light source consists of a relatively narrow-linewidth, widely tuneable-pulsed light source. A wide tuning range should be used; the wider, the better. An example of a typical wide range is 12,8 THz (~ 100 nm).

The maximum frequency increment, $\delta\nu$, between frequency pairs depends on the round trip PMD_{RMS} of the link. While the method is not very sensitive to this parameter, Equation (G.2) provides a reasonable guideline.

$$PMD_{RMS} \delta\nu < 0,25 \quad (G.2)$$

In theory, any value of the source pulse width can be used, for instance from 10 ns to 20 μs . However, in practice, pulses that are too short will test only over shorter link lengths, unless the link is in fact proportionally short; long pulses that are too long can mix with several reflections; at the limit, this is exactly the case with continuous wave light sources.

The PMD value is independent of the pulse width. If shorter link lengths are tested, equivalent results will be achieved by scaling the pulse duration with the link length or by decreasing the averaging time.

The light source shall be frequency stable to avoid spectral instabilities during the measurement period (this is in fact applicable to every PMD test method).

G.2.3 Launch polarization

The light source should be polarized by the PBS over its full wavelength range. If the source is not naturally polarized, use a polarizer at the source output to meet this requirement. In this case, the polarizer will linearly polarize the source incident light over its full wavelength range

in order to fix its SOP. The polarization extinction ratio of the polarizer over the source full wavelength range should be > 20 dB.

G.2.4 Polarization scrambling

Multiple, discrete and random I/O-SOPs are required by WSOSA. Physically, I/O-SOP scrambling consists of inserting a polarization controller, i.e. SOP scrambler, as shown in Figure G.2. Conceptually, the scrambling process can be viewed as follows:

- in the forward direction, the polarized light source SOP followed by the scrambler acts as a single unit, an equivalent polarizer whose axis is set at any point on the Poincaré sphere in order to define the input SOP (I-SOP);
- in the backward (return) direction, the scrambler followed by the analyzer (the PBS) acts as an equivalent analyzer whose axis is set at any point on the Poincaré sphere in order to define the output SOP (O-SOP).

One set of I-SOP/output analyzer-axis (O-SOP) combination is labelled as one I/O-SOP.

The aim is to get the transmissions averaged over uniform, different, discrete and random I/O-SOP distribution. In practice, there exist a number of possible ways to achieve this goal. More details on polarization scrambling and WSOSA can be found in IEC TR 61282-9.

G.2.5 Input/output optics

The input/output optics, as shown in Figure G.2, consist of a circulator, PBS, I/O-SOP scrambler and two detectors, one connected at the output of the circulator and the other to the output of the PBS. The output connector can be an APC connector or a low reflection connector.

A reflector shall be made available at the far end of the link. A high reflection (such as a fibre pigtailed mirror) is preferred in order to maintain sufficiently large dynamic range, but a standard UPC connector with its 4 % reflection ($\sim 14,7$ dB, from an open fibre end) generally allows a good measurement. However, a Faraday-type mirror is not applicable to WSOSA and consequently shall not be used. Reflections from connectors located along the link, as well as the overall Rayleigh backscattering, can be discarded via "time-gated" detection and analysis typical to reflectometry procedure.

G.3 Specimen stability

Minor reflections (such as -50 dB or lower reflectance) located along the last 100 m of the link (for example, with a $1\text{-}\mu\text{s}$ light pulse) will have no effects on the measurements.

The SOPs shall remain stable in the link during the measurement of a frequency pair. Mechanical oscillations and motions of the link during that period can translate into SOP instabilities. The amplitude of these SOP instabilities is a function of the frequency content of the link motion caused by wind (aerial installation), trains running along the link (buried or bridge installation), stress randomly distributed along the link length, or movement of equipment connection cords.

Therefore it is necessary to determine that the link has the required degree of stability before beginning the test.

G.4 Procedure

G.4.1 Set instrument parameters

Some of these settings may need to be modified iteratively depending on the results of trial measurements.

- Select the source frequency region (e.g., 1 300 nm or 1 550 nm) if more than one frequency region is available and set the optical detection on the designated frequency region.
- Inside the designated frequency region, select a wide frequency range, as shown in Figure G.1.
- Use the criterion provided in G.2.2 to define the frequency spacing $\delta\nu$ used during the measurements. As an alternative, determine $\delta\nu$ during a pre-measurement using a smaller number of measurements than during the main measurement.
- Set the acquisition time or number of pulses for power averaging.

The acquisition time shall be selected carefully, long enough for getting better averaging through noise minimization and improved measurement uncertainty but not too long for getting a long measurement time that is too long and potentially suffering from DUT instabilities. This acquisition time is related to the pulse width and the link roundtrip time (two times the length of the link divided by the velocity of light in the link). For a fixed link length, a shorter pulse width gives better measurement spatial resolution but poorer OSNR and measurement uncertainty. A longer pulse width gives better OSNR but poorer resolution. A compromise is consequently needed between the measurement resolution and the OSNR. 200 ms to 300 ms can be considered as a possible compromise.

- Select the total number of wavelength pairs N .

Use $N \sim 200$ as a useful compromise; in this case, the uncertainty $\sigma_{N=200} = 0,075$.

If other values of N than 200 are selected, use the following equation to find σ_N ,

$$\sigma_N = \sigma_{N=200} \sqrt{\frac{200}{N}} \quad (\text{G.3})$$

- Ensure that the I/O-SOP is randomly changed from one centre frequency to another over every frequency pair used in the selected frequency range.
- Attach the link fibre to the instrument.
- Couple the polarization scrambler output to one end of the link.
- If not already done, disconnect the other end of the link or connect the other end of the link to a reflector if required by the targeted measurement dynamic range.
- Ensure that the far end of the link does not consist of an angled connection. If so adapt this angled connection to a flat-face connection.
- In OTDR mode at both frequency extremes, set the sampling location to a position just before the end reflection.

G.4.2 Action of the instrument after measurement initiation

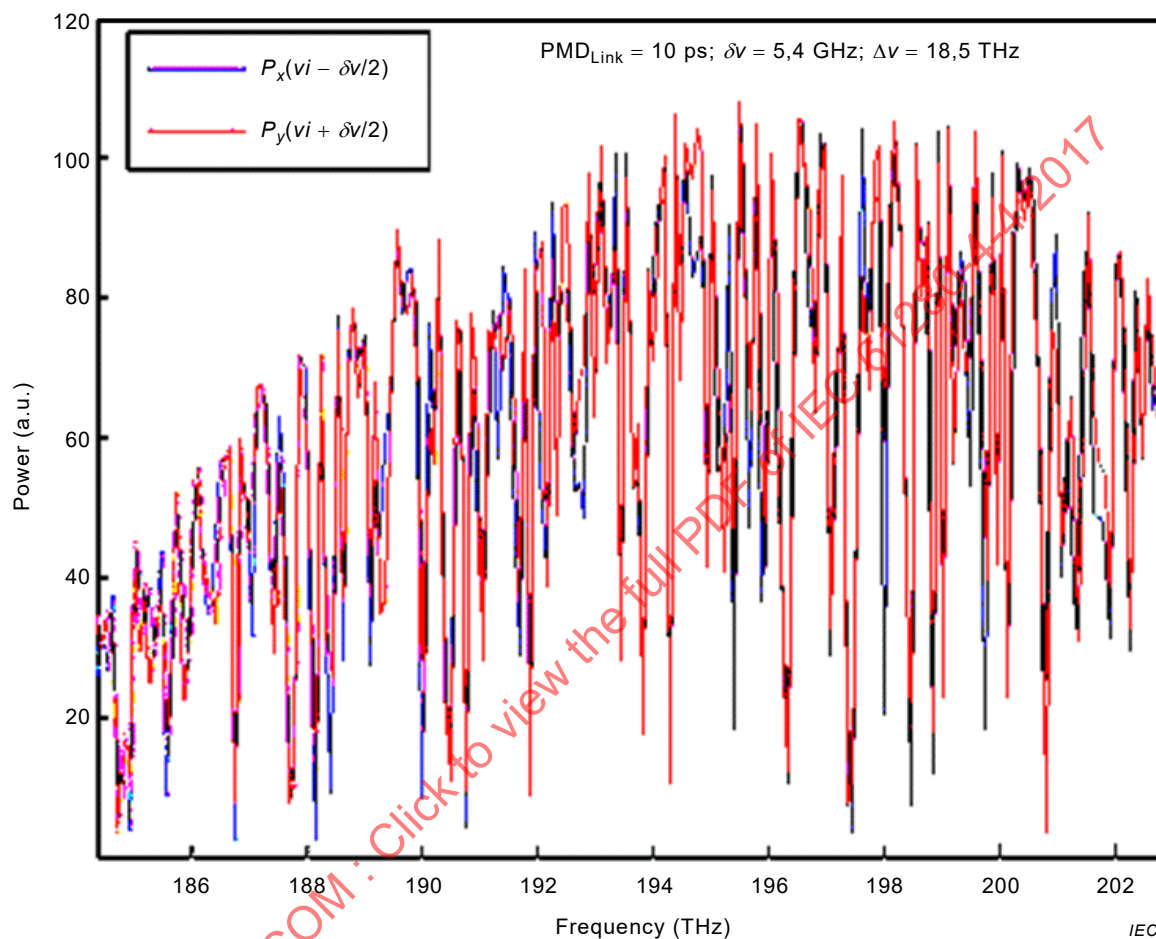
Loop on frequency pairs, indexed by k . For each:

- 1) Select a random I/O-SOP.
- 2) Set the tuneable laser to the lower of the two frequencies.
- 3) Measure the power to detector x , P_x .
- 4) Measure the power to detector y , P_y .
- 5) Calculate the normalized transmission, $T_{k-} = \frac{P_y}{P_x + P_y}$.
- 6) Repeat steps 3-5 but record the normalized transmission as T'_{k-} .
- 7) Set the tuneable laser to the upper of the two frequencies.
- 8) Repeat steps 3-6 but record the normalized transmission values as T_{k+} and T'_{k+} .

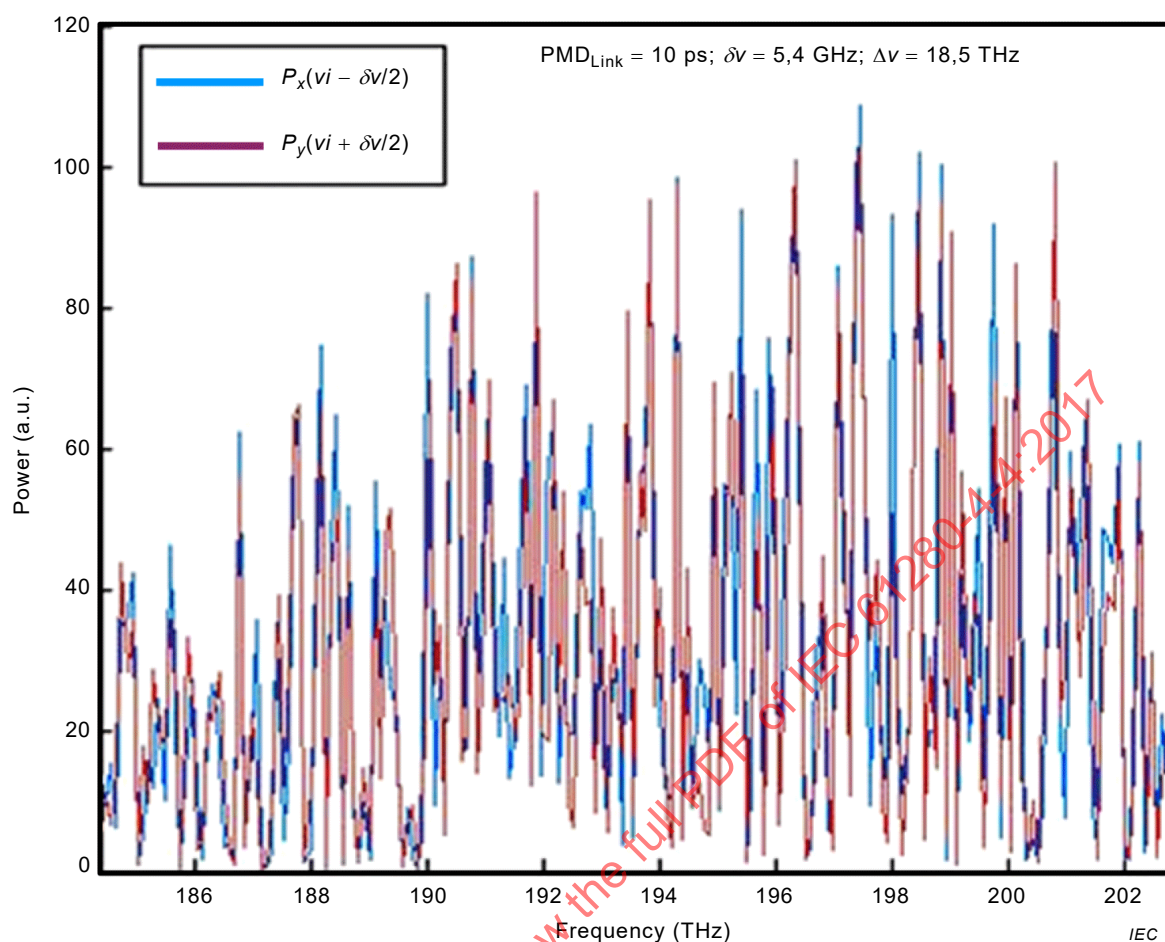
- 9) Calculate the differences, ΔT_k and $\Delta T'_k$ by subtracting the transmission values of the lower frequency from the values for the upper frequency for the non-primed and primed values, respectively.

NOTE The expression "measure the power" in steps 3 and 4 includes capturing and averaging multiple pulses that are reflected from the location before the end reflection.

Figure G.3 illustrates the power measurements.



(a) Power over a frequency pair at the x-side of the PBS



(b) Power over a frequency pair at the y-side of the PBS

NOTE Each data point in a graph represents one I/O-SOP; a total of 200 random I/O-SOPs were used.

Figure G.3 – Typical power measurement results

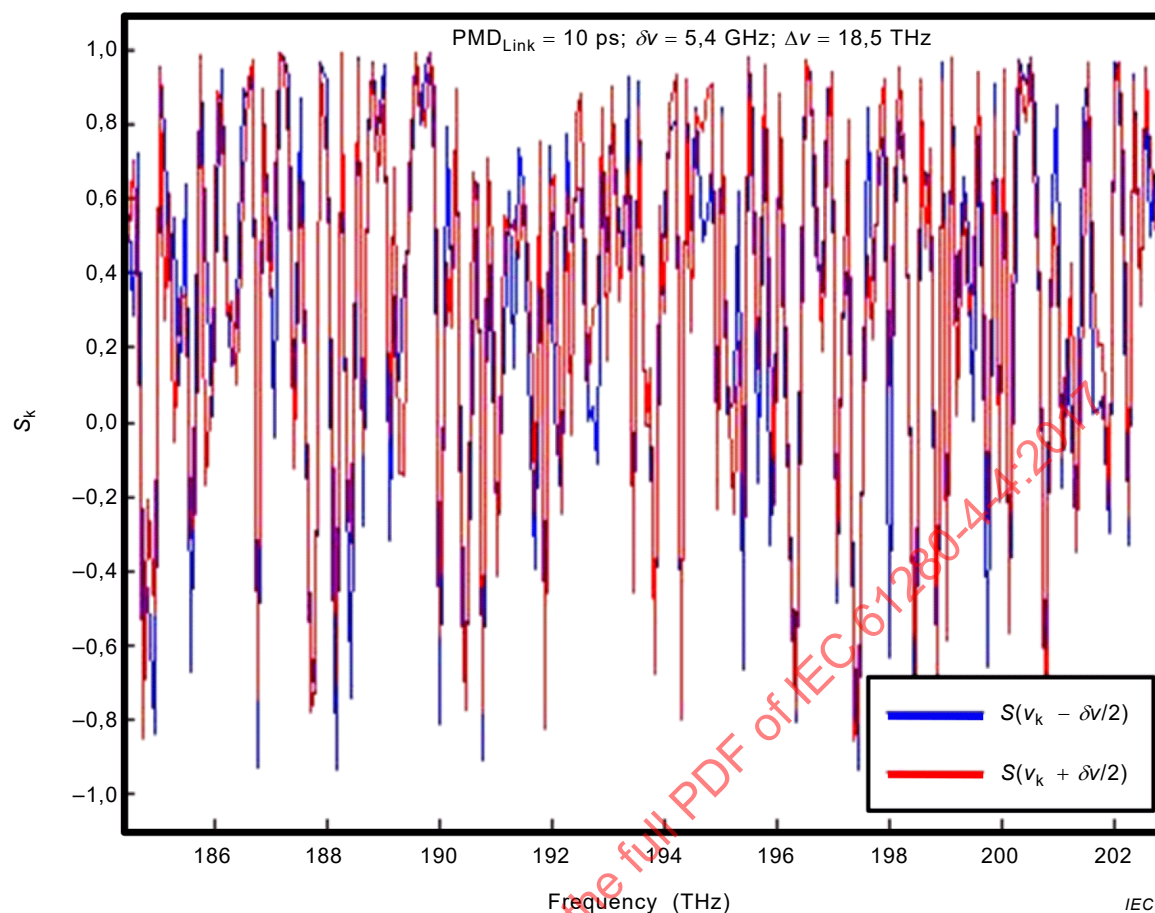
G.5 Calculations

G.5.1 Power normalisation

The power normalization done within the procedure is shown as the following equation.

$$T(\omega) = \frac{1}{2} (1 + \vec{s}(\omega) \cdot \vec{s}_a) = \frac{1}{2} (1 + s(\omega)) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{P_x(\omega) - P_y(\omega)}{P_x(\omega) + P_y(\omega)} \right) = \frac{P_x(\omega)}{P_x(\omega) + P_y(\omega)} \quad (\text{G.4})$$

Figure G.4 illustrates the results for the typical $s(\omega)$ function.



NOTE Each data point in a graph represents one I/O-SOP; a total of 200 random I/O-SOPs were used.

Figure G.4 – Typical $s(\omega)$ for random I/O-SOP

G.5.2 Transmission differences

The transmission differences, ΔT_k and $\Delta T'_k$, calculated in G.4.2 represent two independent estimates of the change in output stokes vector multiplied with the I/O-SOP orientation vector. They are independent in the sense that the noise functions are independent.

Figure G.5 illustrates the transmission difference function.

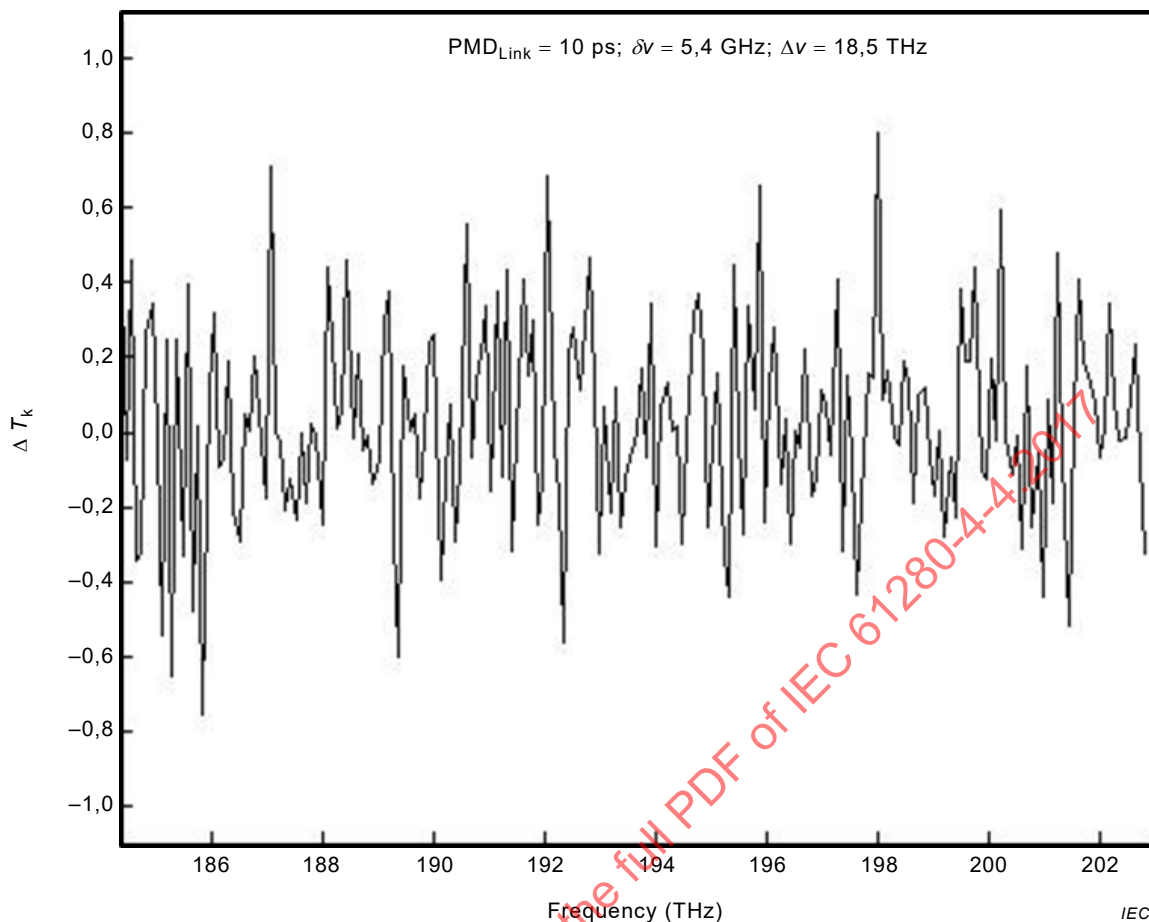


Figure G.5 – Typical transmission difference for a frequency pair and I/O-SOP

G.5.3 Mean-square transmission difference and round trip PMD

Calculate the mean-square transmission difference using the following equation:

$$\langle \Delta T^2 \rangle = \langle \Delta T \Delta T' \rangle = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Delta T_k \Delta T'_k \quad (\text{G.5})$$

Since the primed and non-primed values are independent, the error product term expected value is zero at the same time over a number of occurrences defined by N .

Calculate the roundtrip PMD_{RMS} , as follows:

$$\langle \Delta \tau_{\text{RT}}^2 \rangle^{1/2} = \frac{\alpha_{\text{rs}} \Delta T_0}{2\pi \delta \nu} \left[-\ln \left(1 - \frac{\langle \Delta T^2 \rangle}{\Delta T_0^2} \right) \right] \quad (\text{G.6})$$

where the random I/O-SOP scrambling constant, α_{rs} , and maximum mean-square transmission difference, ΔT_0^2 , are given as: $\alpha_{\text{rs}}^2 = 15$ and $\Delta T_0^2 = 8/45$

More details on the mathematical development of these equations can be found in IEC TR 61282-9.

G.5.4 Determination of PMD

Calculate PMD, both RMS and mean, as follows:

$$PMD_{RMS}^2 = \frac{3}{8} \langle \Delta\tau_{RT}^2 \rangle \quad (G.7)$$

$$PMD_{MEAN}^2 = \frac{1}{\pi} \langle \Delta\tau_{RT}^2 \rangle \quad (G.8)$$

It is important to note that $\Delta\tau_{RT}$ is not equal to two times the forward or end-to-end $\Delta\tau$ (the DGD parameter of interest). However, when averaged over frequency or time, PMD is related to PMD_{RT} through the average roundtrip factor.

Equation (G.8) depends on an assumption that the DGD distribution is Maxwellian.

G.6 Procedures for measuring PMD on installed aerial links

G.6.1 Instability compensation

In WSOSA, the effect of link instabilities on the measured mean-square transmission difference is characterized by a stability coefficient, g_s , which is a function of the temporal SOP fluctuations in the link, as follows:

$$\langle \Delta T \Delta T' \rangle_{wI} = \Delta T_0^2 [1 - g_s R(\delta v)] \quad (G.9)$$

Here, the right side is the measured mean-square transmission difference with instabilities present. It is the same as Equation (G.5) but subscripted with "wI" to distinguish it from the instability compensated value, which will be subscripted with "woI". The autocorrelation function, R_x , is the same as that given in IEC TR 61282-9 and is defined as the true function. In the absence of instabilities, the value of the stability coefficient is one.

Instability occurs over time. Two additional difference functions are available from the measured transmission values to calculate the magnitude of instability. These are:

$$\Delta T_{-k} = T_{-k} - T'_{-k} \quad \Delta T_{+k} = T_{+k} - T'_{+k} \quad (G.10)$$

Equation (G.4) indicates that these differences should be zero in the absence of instability. These are used to define the mean-square transmission instability difference as:

$$\langle \Delta T_{-} \Delta T_{+} \rangle_I = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Delta T_{-k} \Delta T_{+k} \quad (G.11)$$

The instability coefficient is defined as:

$$g_s = 1 - \frac{\langle \Delta T_{-} \Delta T_{+} \rangle}{\Delta T_0^2} \quad (G.12)$$

This can be combined with Equation (G.9) to define a relationship yielding a value for the auto correlation function.

$$R_x(\delta\nu) = 1 - \frac{\langle \Delta T \Delta T' \rangle_{wI} - \langle \Delta T_- \Delta T_+ \rangle_I}{\Delta T_0^2 - \langle \Delta T_- \Delta T_+ \rangle_I} \quad (\text{G.13})$$

Combining this with Equation (G.9) (with g_s set to one), yields the mean-square transmission difference without instabilities.

$$\langle \Delta T \Delta T' \rangle_{wOI} = 1 - R_x(\delta\nu) = \frac{\langle \Delta T \Delta T' \rangle_{wI} - \langle \Delta T_- \Delta T_+ \rangle_I}{\Delta T_0^2 - \langle \Delta T_- \Delta T_+ \rangle_I} \quad (\text{G.14})$$

This value should be substituted for $\langle \Delta T^2 \rangle$ in Equation (G.6).

G.6.2 Approaches to reducing the effects of instabilities

G.6.2.1 General

The compensation for instability outlined in G.6.1 has limits. If the instability parameter, g_s , is less than 0,5, consideration for modifying the measurement should be given.

Basically, there are two main options:

- speed up the measurement;
- come back later.

The following sub-clauses include some ideas for speeding up the measurement.

G.6.2.2 Reducing the acquisition time

Reduce the acquisition time for allowing an increase of the I/O-SOP scrambling rate to levels higher than the link self-scrambling rate, for example up to 2,5 rad/s on the Poincaré sphere.

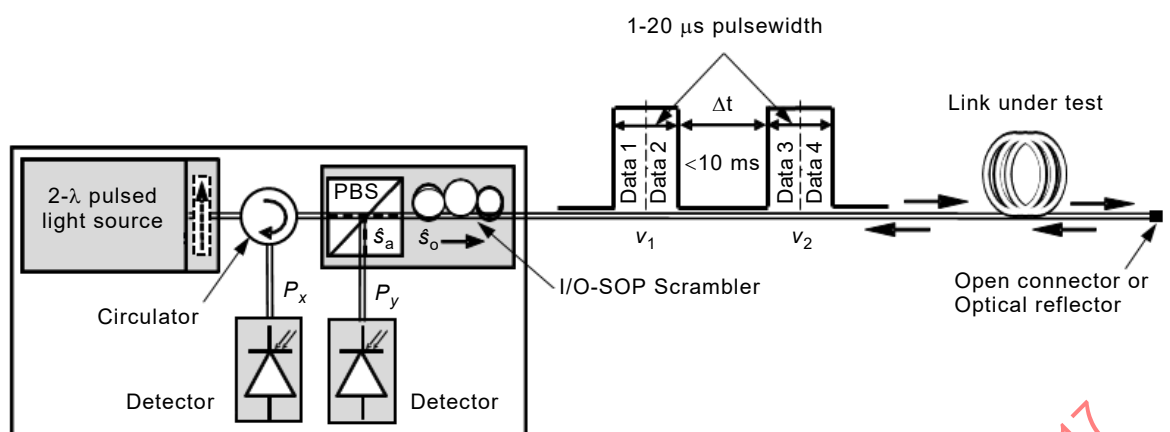
G.6.2.3 OSNR threshold

Increase the minimum SNR threshold by 2 dB to 3 dB by reducing the number of pulses that are averaged for each power measurement.

This approach decreases the measurement sensitivity to the link instabilities, but with a slight decrease of the dynamic range and the spectral range, especially on a high-loss link.

G.6.2.4 Two pulses, each at different frequency

Use a source capable of launching two pulses each at different frequencies, as shown in Figure G.6.



IEC

Figure G.6 – Example of 2-pulse implementation in presence of instabilities

This experimental implementation ensures a significant reduction of the effect of the link instabilities on the measured mean-square transmission difference.

G.6.2.5 Two frequencies in the same pulse

Use a source capable of launching two different frequencies in the same pulse with two-channel tuneable filter to separate the two different frequencies.

Annex H (informative)

PMD determination by Method C

H.1 General

Annex H provides algorithms for determining the RMS width of interferometric data that are measured using Method C. Examples of such interferograms are shown in Annex C. The main reason for these algorithms is to remove the effects of noise.

H.2 Traditional analysis

The following algorithm applies only to Method C (TINTY) in the context of the assumptions described in Annex C.

Let $\tilde{I}_j$ denote the measured intensity of the interferogram at increasing positions t_j (ps), $j = 1 \dots N$.

Step 1: Computation of the zero intensity $\tilde{I}_0$ and the noise amplitude Na

Definition: $N_s = \text{round}(5 N/100)$ is the integer at which $\tilde{I}_j$ is approximately 5 %.

$$\tilde{I}_0 = \frac{\sum_{j=1}^{N_s} (\tilde{I}_j + \tilde{I}_{N_s-j})}{2N_s} \quad (\text{H.1})$$

$$X_2 = \frac{\sum_{j=1}^{N_s} (\tilde{I}_j^2 + \tilde{I}_{N_s-j}^2)}{2N_s} \quad (\text{H.2})$$

$$Na = \sqrt{(X_2 - \tilde{I}_0^2)} \quad (\text{H.3})$$

Step 2: Definition of the shifted intensity I_j

$$I_j = \tilde{I}_j - \tilde{I}_0 \quad \text{if } (\tilde{I}_j - \tilde{I}_0) > 4Na \quad (\text{H.4})$$

$$I_j = 0 \quad \text{if } (\tilde{I}_j - \tilde{I}_0) \leq 4Na \quad (\text{H.5})$$

Step 3: Computation of the centre C of the interferogram

$$C = \frac{\sum_{j=1}^{N_s} t_j I_j}{\sum_{j=1}^{N_s} I_j} \quad (\text{H.6})$$

Step 4: Removal of the autocorrelation peak

Definition:

$$j_l = \text{the largest index } j \text{ such that } C - t_j > t_c \quad (\text{H.7})$$

$$j_r = \text{the smallest index } j \text{ such that } t_j - C > t_c \quad (\text{H.8})$$

where

t_c is the source coherence time.

NOTE For cross-correlation interferograms, the following definition applies:

$$j_r = j_l + 1 \quad (\text{H.9})$$

Step 5: Computation of the second moment S of the interferogram

$$S = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{j_l} (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=1}^{j_l} I_j}} + \sqrt{\frac{\sum_{j=j_r}^N (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=j_r}^N I_j}} \right\} \quad (\text{H.10})$$

Step 6: Truncate the interferogram

$$\text{Set } j_{\min} \text{ to the largest index } j \text{ such that } C - t_j > 2S \quad (\text{H.11})$$

$$\text{Set } j_{\max} \text{ to the smallest index } j \text{ such that } t_j - C > 2S \quad (\text{H.12})$$

Step 7: Computation of the second moment σ_s of the interferogram

$$\sigma_s = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{j=j_{\min}}^{j_l} (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=1}^{j_l} I_j}} + \sqrt{\frac{\sum_{j=j_r}^{j_{\max}} (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=j_r}^{j_{\max}} I_j}} \right\} \quad (\text{H.13})$$

Step 8: Computation of the σ_ε of the Gaussian $\exp\left[-\frac{(t-C)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right]$ such that

$$\sigma_s = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{\int_{t_{jmin}}^{t_{j1}} (t-C)^2 \exp\left[-\frac{(t-C)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right] dt}{\int_{t_{jmin}}^{t_{j1}} \exp\left[-\frac{(t-C)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right] dt}} + \sqrt{\frac{\int_{t_{jr}}^{t_{jmax}} (t-C)^2 \exp\left[-\frac{(t-C)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right] dt}{\int_{t_{jr}}^{t_{jmax}} \exp\left[-\frac{(t-C)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right] dt}} \right\} \quad (H.14)$$

σ_ε is computed by iteration from (H.14).

H.3 General analysis

The following algorithm results in a robust RMS width for either the composite square cross-correlation or autocorrelation envelopes using Method C (GINTY).

The algorithm is iterative. For a given iteration, the full data array is divided into two sets: the central portion, M , containing the signal and the tails, T , which contain noise. Each iteration results in different definitions for these sets. The result converges when either the computed RMS width ceases to vary or when the set definitions stabilize. For an iteration, the number of data points in each set is denoted as N_M and N_T .

Let $\tilde{I}_j$ denote the measured intensity of the envelope at increasing positions t_j (ps), $j = 1 \dots N$.

The initial definition of the set T is the first and last 5 % of the whole array.

Step 1: Computation of the zero intensity $\tilde{I}_0$

$$\tilde{I}_0 = \sum_{j \in T} \tilde{I}_j / N_T \quad (H.15)$$

Step 2: Definition of the shifted intensity I_j

$$I_j = \tilde{I}_j - \tilde{I}_0 \quad \text{all } N \quad (H.16)$$

Step 3: Computation of the centre C of the interferogram

$$C = \frac{\sum_{j \in M} t_j I_j}{\sum_{j \in M} I_j} \quad (H.17)$$

Step 4: Computation of the RMS width σ of the squared envelope

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{j \in M} (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j \in M} I_j} \quad (H.18)$$

Step 5: Redefinition of the sets

Define M as the set of points for which $C - 4\sigma \leq t_j \leq C + 4\sigma$.

Define T as the rest of the points.

Step 6: Repetition of steps 1 to 5 until the results converge

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61280-4-4:2017

Bibliography

- [1] GISIN, N., GISIN, B., VON DER WEID, J.P. and PASSY, R. How accurately can one measure a statistical quantity like polarization-mode dispersion. *Photonics Technology Letters*, Dec. 1996, Vol. 8, No. 12.
- [2] JONES, RC. A new calculus for the treatment of optical systems. VI. Experimental determination of the matrix. *J. Optical Soc. Am.*, 1947, 37, p. 110-112.
- [3] WILLIAMS, PA. *Modulation phase-shift measurement of PMD using only four launched polarization states: a new algorithm*. Electronics Letters Online No. 19991068, July 1999.
- [4] IVES, D. PMD on Installed Links – Intercomparison – Analysis of Results TIA TR-42.11/2009-02-004.
- [5] Ednay, R. et al. PMD Measurement System Intercomparison. TIA TR-42.11/2009-02-005.
- [6] Ednay, R. Field Trial of PMD Test methods & investigation into the dynamics of polarisation effects in a variety of installed cable environments. *Terena Networking Conference, June 2010, Vilnius, Lithuania*.
- [7] CYR, N., SCHINN, G.W. and GIRARD, A. *Stokes parameter analysis method, the consolidated test method for PMD measurements*. The National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC), '99 Session A6, Polarization effects in systems, Sept. 26-30, 1999.
- [8] GISIN, N., VON DER WEID, J.P. and PELLAUX, J.P. Polarization mode-dispersion of short and long single-mode fibers. *J. Lightwave Technol.*, 1991, Vol. 9, p. 821-827.
- [9] GISIN, N., PASSY, R. and VON DER WEID, J.P. Definitions and measurements of polarization mode dispersion: Interferometric versus fixed analyser methods. *J. Lightwave Technol.*, Vol. 6, p. 730-732, 1994.
- [10] GISIN, N. Solutions of the dynamical equation for polarization dispersion. *Opt. Commun.*, 1991, Vol. 86, p. 371-373.
- [11] CYR, N. Polarization-mode dispersion measurement: generalization of the interferometric method to any coupling regime. *J. Lightwave Technol.*, March 2004, Vol. 22, No. 3, p. 794-805.
- [12] CORSI, F., GALTAROSSA, A., PALMIERI, L., SCHIANO M., TAMBOSSO T. Continuous-Wave Backreflection Measurement of Polarization Mode Dispersion, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 11, N.4, April 1999, p. 451-453.
- [13] IEC 60793-1-48:2003, *Optical fibres – Part 1-48: Measurement methods and test procedures – Polarization mode dispersion*
- [14] IEC 60793-1-48:2007, *Optical fibres – Part 1-48: Measurement methods and test procedures – Polarization mode dispersion*
- [15] IEC 60793-2-50, *Optical fibres – Part 2-50: Product specifications – Sectional specification for class B single-mode fibres*
- [16] IEC 61280-4-4:2006, *Fibre optic communication subsystem test procedures – Part 4-4: Cable plants and links – Polarization mode dispersion measurement for installed links*

- [17] IEC 61290-11-1, *Optical amplifiers – Test methods – Part 11-1: Polarization mode dispersion parameter – Jones matrix eigenanalysis (JME)*
 - [18] IEC 61290-11-2, *Optical amplifiers – Test methods – Part 11-2: Polarization mode dispersion parameter – Poincaré sphere analysis method*
 - [19] IEC 61300-3-32, *Fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures – Part 3-32: Examinations and measurements – Polarization mode dispersion measurement for passive optical components*
 - [20] IEC TR 61282-3, *Fibre optic communication system design guides – Part 3: Calculation of link polarization mode dispersion*
-

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61280-4-4:2017

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	89
INTRODUCTION.....	91
1 Domaine d'application	92
2 Références normatives	92
3 Termes, définitions, symboles et termes abrégés	92
3.1 Termes et définitions	92
3.2 Symboles et termes abrégés.....	93
4 Contexte des propriétés de la dispersion de mode de polarisation.....	94
5 Méthodes de mesure	96
5.1 Méthodes de mesure de la PMD	96
5.1.1 Généralités.....	96
5.1.2 Méthode A: Analyse fixe avec transformée de Fourier (FA-FT)	97
5.1.3 Méthode B: Évaluation des paramètres de Stokes (SPE).....	97
5.1.4 Méthode C: Méthode interférométrique	98
5.1.5 Méthode D: Évaluation des paramètres de Stokes utilisant la lumière rétro réfléchée	98
5.1.6 Méthode E: Technique de déphasage modulé.....	98
5.1.7 Méthode F: Déphasage par polarisation (PPS)	98
5.1.8 Méthode G: Analyse OTDR et SOP par balayage de longueur d'onde (WSOSA).....	98
5.2 Structure du document.....	99
5.3 Méthode de mesure de référence.....	99
6 Configurations de mesure.....	99
6.1 Liaison passive par câblage	99
6.2 Liaison incluant des amplificateurs.....	100
6.3 Liaison incluant les modules de compensation de dispersion chromatique	100
6.3.1 Généralités.....	100
6.3.2 DCM fondé sur un réseau	100
6.4 Liaison incluant des ROADMs.....	100
6.4.1 Généralités.....	100
6.4.2 Configuration point à point multicanaux	101
6.4.3 Configuration monocanal	101
7 Considérations de mesure	101
7.1 Généralités	101
7.2 Plage de longueurs d'onde.....	101
7.3 Étendue de mesure de la PMD.....	101
7.4 Étendue dynamique de mesure	102
7.5 Déplacement de la fibre	102
7.6 Brouillage des SOP en entrée et en sortie.....	102
7.6.1 Généralités.....	102
7.6.2 Polariseurs/brouilleurs	102
7.6.3 Ensemble de Mueller à 9 états.....	103
7.6.4 Brouillage aléatoire.....	103
7.7 Perte dépendant de la polarisation.....	103
7.8 Considérations concernant les amplificateurs	103
7.8.1 Généralités.....	103
7.8.2 Isolateurs optiques	104

7.8.3	Plage de longueurs d'onde	104
7.8.4	Niveaux de puissance	104
7.8.5	Bruit de l'émission spontanée amplifiée (ASE)	104
7.9	Considérations concernant l'emplacement des équipements	104
8	Appareillage	104
8.1	Généralités	104
8.2	Source lumineuse et polariseurs	105
8.3	Optique d'entrée	105
8.4	Extracteur de mode de gaine	106
8.5	Filtre de mode d'ordre élevé	106
8.6	Connexion de sortie	106
8.7	Optique de sortie	106
8.8	Détecteur	106
8.9	Calculateur ou plate-forme d'essai	106
8.10	Moyen de réduction des phénomènes d'émission spontanée amplifiée	107
9	Échantillonnage et éprouvettes	107
10	Procédure	107
11	Calcul ou interprétation des résultats	107
12	Documentation	108
12.1	Informations exigées pour chaque mesure	108
12.2	Informations à fournir	108
13	Informations relatives à la spécification	108
Annexe A (normative)	Méthode de l'analyseur fixe	109
A.1	Appareillage	109
A.1.1	Schémas fonctionnels	109
A.1.2	Source lumineuse	111
A.1.3	Analyseur	112
A.1.4	Contrôle facultatif de la polarisation à l'entrée et à la sortie de la liaison en essai	112
A.2	Procédure	112
A.2.1	Plage de longueurs d'onde et incrément de longueurs d'onde	112
A.2.2	Réalisation des balayages	113
A.3	Calculs – Transformée de Fourier	114
A.3.1	Généralités	114
A.3.2	Prétraitement des données et transformée de Fourier	115
A.3.3	Adaptation des données de transformation	115
A.3.4	Domaine spectral	118
Annexe B (normative)	Méthode d'évaluation des paramètres de Stokes	119
B.1	Appareillage	119
B.1.1	Schémas fonctionnels	119
B.1.2	Source lumineuse	120
B.1.3	Polarimètre	120
B.2	Procédure	120
B.3	Calculs	121
B.3.1	Généralités	121
B.3.2	Analyse des vecteurs propres de la matrice de Jones (JME)	122
B.3.3	Analyse de la sphère de Poincaré (PSA) et calcul du DGD	123
Annexe C (normative)	Méthode interférométrique	125

C.1	Généralités	125
C.2	Analyse traditionnelle (TINTY)	126
C.2.1	Appareillage	126
C.2.2	Procédure.....	127
C.2.3	Calculs	128
C.3	Analyse générale (GINTY)	129
C.3.1	Avantage	129
C.3.2	Appareillage	129
C.3.3	Procédure.....	131
C.3.4	Calculs	132
Annexe D (informative) Méthode d'évaluation des paramètres de Stokes utilisant la lumière rétroréfléchie		134
D.1	Fonctionnalité	134
D.2	Appareillage.....	134
D.2.1	Schéma fonctionnel	134
D.2.2	Coupleur directif	134
D.2.3	Connecteur oblique.....	134
D.2.4	Terminaison de l'extrémité éloignée.....	134
D.3	Procédure	135
D.4	Calcul et interprétation des résultats	135
Annexe E (informative) Méthode du déphasage par modulation		136
E.1	Appareillage.....	136
E.1.1	Présentation et schémas fonctionnels.....	136
E.1.2	Source(s) lumineuse(s).....	137
E.1.3	Modulation.....	138
E.1.4	Contrôle de la polarisation.....	139
E.1.5	Optique d'entrée et optique de sortie	139
E.1.6	Détecteur optique et circuits électroniques de détection de phase	140
E.1.7	Signal de référence	140
E.2	Procédure	140
E.2.1	Fréquence de modulation	140
E.2.2	Balayage des longueurs d'onde et mesure du DGD	141
E.2.3	Étalonnage	143
E.3	Calculs.....	143
E.3.1	Calcul du DGD.....	143
E.3.2	Calcul de la PMD	145
Annexe F (informative) Méthode de déphasage par polarisation		146
F.1	Appareillage.....	146
F.1.1	Schéma fonctionnel	146
F.1.2	Source lumineuse	146
F.1.3	Modulation.....	146
F.1.4	Contrôle de la polarisation	147
F.1.5	Optique de sortie	147
F.1.6	Détecteurs optiques.....	147
F.1.7	Comparateur d'amplitude et de phase.....	148
F.1.8	Signal de référence	148
F.2	Procédure	148
F.2.1	Fréquence de modulation	148
F.2.2	Incrément de longueur d'onde	148

F.2.3	Balayage des longueurs d'onde et mesure des DGD	149
F.2.4	Étalonnage	149
F.3	Calculs	150
F.3.1	Présentation des résultats	150
F.3.2	Détermination du DGD	150
F.3.3	Calcul de la PMD	151
Annexe G (normative) Analyse OTDR et SOP par balayage de longueur d'onde (WSOSA) et méthode d'essai PMD		152
G.1	Généralités	152
G.2	Appareillage	153
G.2.1	Schéma fonctionnel	153
G.2.2	Source lumineuse	153
G.2.3	Polarisation par injection	154
G.2.4	Brouillage de polarisation	154
G.2.5	Optiques d'entrée/sortie	154
G.3	Stabilité des éprouvettes	155
G.4	Procédure	155
G.4.1	Réglage des paramètres d'instrument	155
G.4.2	Action de l'instrument après le début des mesures	156
G.5	Calculs	158
G.5.1	Normalisation de puissance	158
G.5.2	Différences de transmission	159
G.5.3	Différence de transmission quadratique moyenne et PMD aller et retour	160
G.5.4	Détermination de la PMD	161
G.6	Procédures de mesure de la PMD sur les liaisons aériennes installées	161
G.6.1	Compensation de l'instabilité	161
G.6.2	Méthodes de réduction des effets des instabilités	162
Annexe H (informative) Détermination de la dispersion de mode de polarisation (PMD) par la méthode C		164
H.1	Généralités	164
H.2	Analyse traditionnelle	164
H.3	Analyse générale	166
Bibliographie		168
Figure 1 – Configuration type d'une liaison passive par câblage		99
Figure 2 – Exemple de configuration de liaison incluant des amplificateurs		100
Figure A.1 – Schémas fonctionnels relatifs à l'analyseur fixe		111
Figure A.2 – Exemple de fonction R pour la méthode à analyseur fixe		114
Figure A.3 – Onde sinusoïdale modulée		116
Figure A.4 – PMD par l'analyse de Fourier		117
Figure B.1 – Schéma fonctionnel pour la méthode B utilisant une source à bande étroite (laser accordable)		119
Figure B.2 – Schéma fonctionnel pour la méthode B utilisant une source à large bande (ASE)		120
Figure C.1 – Dispositif générique pour la méthode C (INTY)		125
Figure C.2 – Schéma fonctionnel pour la méthode C (TINTY)		127
Figure C.3 – Données types obtenues par la méthode C (TINTY)		128
Figure C.4 – Schéma fonctionnel pour la méthode C (GINTY)		130

Figure C.5 – Données types de couplage de mode aléatoire obtenues par la méthode C (GINTY).....	132
Figure C.6 – Données types de couplage de mode mixte obtenues par la méthode C (GINTY).....	132
Figure D.1 – Disposition pour la méthode D.....	134
Figure E.1 – Appareillage de base.....	136
Figure E.2 – Disposition de l'appareillage pour la modulation de polarisation.....	137
Figure E.3 – États de Mueller sur la sphère de Poincaré.....	142
Figure E.4 – DGD en fonction de la longueur d'onde.....	143
Figure E.5 – Histogramme du DGD.....	144
Figure F.1 – Schéma fonctionnel pour la méthode F (méthode de déphasage par polarisation).....	146
Figure F.2 – DGD en fonction de la longueur d'onde pour un dispositif à couplage de mode aléatoire.....	150
Figure G.1 – Représentation du domaine de fréquence et des paramètres pour l'analyse WSOSA.....	152
Figure G.2 – Mise en œuvre expérimentale générique type pour l'analyse WSOSA.....	153
Figure G.3 – Résultats types de mesure de la puissance.....	158
Figure G.4 – Fonctions $s(\omega)$ type pour I/O-SOP aléatoire.....	159
Figure G.5 – Différence de transmission type pour une paire de fréquences et I/O-SOP.....	160
Figure G.6 – Exemple de mise en œuvre à deux impulsions en présence d'instabilités.....	163
Tableau E.1 – Exemple d'ensemble de Mueller.....	143

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**PROCÉDURES D'ESSAI DES SOUS-SYSTÈMES
DE TÉLÉCOMMUNICATION FIBRONIQUES –****Partie 4-4: Installations de câbles et liaisons – Mesure de la dispersion
de mode de polarisation pour les liaisons installées**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Électrotechnique 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. À 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. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels 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.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable 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 dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit 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 n'est responsable 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, 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, 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 de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, 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 le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 61280-4-4 a été établie par le sous-comité 86C: Systèmes et dispositifs actifs à fibres optiques, du comité d'études 86 de l'IEC: Fibres optiques.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 2006. Cette deuxième édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) suppression de la théorie et remplacement par une référence à l'IEC TR 61282-9;
- b) ajout, en tant qu'Annexe G, d'une nouvelle méthode, à savoir analyse OTDR et SOP par balayage de longueur d'onde (WSOSA);

- c) ajout d'une description succincte de chaque méthode à l'Article 5;
- d) conversion des méthodes E et F en Annexes E et F informatives;
- e) ajout d'un nouvel Article (6) sur les configurations de mesure;
- f) ajout d'un nouvel Article (7) sur les considérations de mesure;
- g) extension de l'Article 10 sur la procédure;
- h) amélioration de plusieurs diagrammes dédiés à l'appareillage;
- i) plusieurs clarifications internes à l'Annexe H portant sur les mesures et les calculs effectués.

La présente version bilingue (2020-09) correspond à la version anglaise monolingue publiée en 2017-03.

La version française de cette norme n'a pas été soumise au vote.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61280, publiées sous le titre général *Procédures d'essai des sous-systèmes de télécommunication fibroniques*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendée.

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

La dispersion de mode de polarisation (PMD – *polarization mode dispersion*) est un paramètre statistique. La reproductibilité des mesures dépend de la méthode choisie, mais elle est également limitée par le niveau de la PMD de la liaison et la plage accessible de longueurs d'onde. Gisin [1]¹ a établi une limite de reproductibilité théorique indépendante de la méthode de mesure en considérant par hypothèse des conditions de mesure idéales.

À l'origine, les principes de l'IEC 61280-4-4:2006 étaient étroitement alignés sur ceux de l'IEC 60793-1-48:2003 concernant les fibres optiques et la méthode d'essai par câble à fibres optiques, axée sur les aspects liés à la mesure des longueurs de fabrication. Toutefois, l'IEC 60793-1-48:2007 a supprimé les méthodes d'essai qui ne sont plus intéressantes pour les fabricants de fibres et de câbles. Ces méthodes ont été conservées sous forme d'Annexes informatives D, E et F dans le présent document, et une nouvelle méthode d'essai G a été ajoutée.

Le présent document actualise également les méthodes A, B et C et ajoute des informations supplémentaires applicables à l'essai d'une installation câblée.

NOTE 1 Des méthodes d'essai relatives aux longueurs de fabrication de fibres optiques et de câbles à fibres optiques sont données dans l'IEC 60793-1-48.

NOTE 2 Des méthodes d'essai relatives aux amplificateurs optiques (OA – optical amplifiers) sont données dans l'IEC 61290-11-1 et dans l'IEC 61290-11-2.

NOTE 3 Des méthodes d'essai relatives aux composants optiques passifs sont données dans l'IEC 61300-3-32.

NOTE 4 L'IEC TR 61282-3 contient des lignes directrices relatives au calcul de la PMD pour des liaisons comprenant des composants tels que des compensateurs de dispersion ou des amplificateurs optiques.

NOTE 5 L'IEC TR 61282-9 comporte des recommandations générales supplémentaires concernant les mesures de la PMD et la théorie contextuelle.

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

PROCÉDURES D'ESSAI DES SOUS-SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION FIBRONIQUES –

Partie 4-4: Installations de câbles et liaisons – Mesure de la dispersion de mode de polarisation pour les liaisons installées

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61280 fournit des méthodes uniformes de mesure de la dispersion de mode de polarisation (PMD) de liaisons unimodales installées. Une liaison installée est le chemin optique entre l'émetteur et le récepteur ou une partie de ce chemin optique. Ces mesures peuvent être utilisées afin d'évaluer si une liaison donnée est adaptée à des applications à débit binaire élevé ou pour connaître les relations entre différents attributs connexes d'une transmission. Le présent document se concentre sur les méthodes de mesure et les exigences relatives à la mesure de grandes longueurs d'une installation câblée qui peut également inclure d'autres éléments optiques, tels que des épissures, des connecteurs, des amplificateurs, des modules de compensation de dispersion chromatique, des composants de multiplexage ou multiplexeurs par répartition en longueur d'onde dense (DWDM – *dense wavelength division multiplexing or multiplexer*), des multiplexeurs, des commutateurs sélectifs en longueur d'onde, ainsi qu'un multiplexeur optique d'insertion-extraction reconfigurable (ROADMS – *re-configurable optical add drop multiplexer*).

Le présent document se concentre sur l'appareillage, les procédures et les calculs nécessaires pour effectuer des mesures. L'IEC TR 61282-9 explique la théorie qui régit les méthodes d'essai.

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 60793-1-44, *Fibres optiques – Partie 1-44: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Longueur d'onde de coupure*

IEC 61300-3-35, *Dispositifs d'interconnexion et composants passifs à fibres optiques – Méthodes fondamentales d'essais et de mesures – Partie 3-35: Examens et mesures – Examen visuel des connecteurs à fibres optiques et des émetteurs-récepteurs à embase fibrée*

IEC TR 61282-9, *Fibre optic communication system design guides – Part 9: Guidance on polarization mode dispersion measurements and theory* (disponible en anglais seulement)

IEC TR 62627-01, *Fibre optic interconnecting devices and passive components – Part 01: Fibre optic connector cleaning methods* (disponible en anglais seulement)

3 Termes, définitions, symboles et termes abrégés

3.1 Termes et définitions

Aucun terme n'est défini dans le présent document.

L'ISO et l'IEC 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>

3.2 Symboles et termes abrégés

c	vitesse de la lumière dans le vide (299792458 m/s)
h	longueur de couplage (également appelée paramètre h)
L	longueur de la liaison
t_c	temps de cohérence de source optique (méthode C)
$\delta\lambda$	incrément (intervalle, espacement ou taille d'échelon) de longueur d'onde
$\delta\nu$	incrément (intervalle, espacement ou taille d'échelon) de fréquence optique
$\Delta\lambda$	largeur de raie ou largeur spectrale de la source optique (largeur à mi-hauteur (FWHM) sauf spécification contraire)
$\Delta\theta$	angle de rotation sur la sphère de Poincaré
$\delta\tau$	temps d'arrivée différents de différentes composantes de polarisation
$\delta\tau_{\max}$	valeur $\delta\tau$ maximale mesurable
$\delta\tau_{\min}$	valeur $\delta\tau$ minimale qui peut être mesurée
$\Delta\tau$	valeur du retard de groupe différentiel
$\langle\Delta\tau\rangle$	retard de groupe différentiel (DGD) moyen sur une plage de longueurs d'onde ou valeur de PMD_{moyenne}
$\langle\Delta\tau^2\rangle^{1/2}$	valeur efficace (EFF) du retard de groupe différentiel (DGD) sur une plage de longueurs d'onde ou valeur de PMD_{EFF}
$\Delta\tau_{\max}$	valeur $\Delta\tau$ maximale qui peut être mesurée
$\Delta\omega$	variation de fréquence angulaire dans la méthode B
λ	longueur d'onde d'essai utilisée pour mesurer la PMD
λ_0	longueur d'onde centrale de la source lumineuse
ν	fréquence optique de la lumière
σ_R	moment d'ordre deux des données issues de la transformée de Fourier
σ_0	largeur de la valeur efficace des carrés de l'enveloppe d'autocorrélation
σ_x	largeur de la valeur efficace des carrés de l'enveloppe de corrélation croisée
σ_ε	largeur de la valeur efficace de l'interférogramme
ω	fréquence optique angulaire
ASE	amplified spontaneous emission (émission spontanée amplifiée)
DCF	(chromatic) dispersion compensating fibre (fibre de compensation de dispersion (chromatique))
DCM	(chromatic) dispersion compensating module (module de compensation de dispersion (chromatique))
DGD	differential group delay (retard de groupe différentiel)
DOP	degree of polarization (degré de polarisation)
DUT	device under test (dispositif en essai)
DWDM	dense wavelength division multiplexing or multiplexer (multiplexage par répartition en longueur d'onde dense ou multiplexeur)

FA	fixed analyzer (analyseur fixe)
FA-FT	fixed analyzer-Fourier transform (PMD test method) (analyseur fixe-Transformée de Fourier (méthodes d'essai PMD))
FBG	fibre Bragg grating (réseau de Bragg sur fibre)
FET	field effect transistor (transistor à effet de champ)
FWHM	full-width half-maximum (largeur à mi-hauteur)
GINTY	general interferometric analysis (PMD test method) (analyse interférométrique générale (méthode d'essai PMD))
INTY	interferometry (PMD test method) (interférométrie (méthode d'essai PMD))
I/O-SOP	input-output state of polarization (état de polarisation entrée-sortie)
JME	Jones matrix eigenanalysis (PMD test method) (analyse des vecteurs propres de la matrice de Jones) (méthode d'essai PMD)
LED	light emitting diode (diode électroluminescente)
NLE	non-linear effect (effet non linéaire)
OA	optical amplifier (amplificateur optique)
OSA	optical spectrum analyzer (analyseur de spectre optique)
PDL	polarization dependent loss (perte dépendant de la polarisation)
PIN (diode)	positive intrinsic negative (diode layers) ((couches de diodes) négatives intrinsèques positives)
PMD	polarization mode dispersion (dispersion de mode de polarisation)
PPS	polarization phase shift (déphasage par polarisation)
PSA	Poincaré sphere analysis (analyse de la sphère de Poincaré)
PSP	principal SOP (état de polarisation principal)
RBW	resolution bandwidth (largeur de bande de résolution)
RMC	random mode coupling (couplage de mode aléatoire)
EFF	valeur efficace
ROADM	re-configurable optical add drop multiplexer (multiplexeur optique d'insertion-extraction reconfigurable)
RTM	reference test method (méthode de mesure de référence)
SMF	single-mode fibre (fibre unimodale)
SOP	state of polarization (état de polarisation)
SPE	Stokes parameter evaluation (PMD test method) (évaluation des paramètres de Stokes (méthode d'essai PMD))
TINTY	traditional interferometric analysis (PMD test method) (analyse interférométrique traditionnelle (méthode d'essai PMD))
WSOSA	wavelength scanning OTDR and SOP analysis (PMD test method) (analyse OTDR et SOP par balayage de longueur d'onde (méthode d'essai PMD))
WSS	wavelength selective switch (commutateur sélectif en longueur d'onde)

4 Contexte des propriétés de la dispersion de mode de polarisation

La PMD provoque l'élargissement d'une impulsion optique dans le domaine temporel. Cette dispersion peut détériorer les qualités de fonctionnement d'un système de télécommunication. L'effet peut être lié aux vitesses différentielles de phase et de groupe et aux temps d'arrivée $\delta\tau$ correspondants des différentes composantes de polarisation du signal. Pour une source à bande suffisamment étroite, l'effet peut être lié à un retard de groupe différentiel (DGD), $\Delta\tau$, entre paires d'états de polarisation principaux (PSP) polarisés orthogonalement pour une longueur d'onde donnée. Pour une transmission à large bande, les temps divergent et

conduisent à une impulsion de sortie élargie dans le domaine temporel. Dans ce cas, l'élargissement peut être lié à la valeur efficace (EFF) des valeurs de DGD.

Pour de grandes longueurs de fibres, le DGD varie de manière aléatoire tant dans le domaine temporel que dans le domaine spectral, dans la mesure où il dépend des informations détaillées de la biréfringence sur toute la longueur de la fibre. Il est également sensible aux variations de température et aux perturbations mécaniques le long de la fibre. Pour cette raison, une façon utile de caractériser la PMD des fibres de grande longueur prend la forme d'une valeur de DGD moyenne sur une plage de fréquence optique suffisamment grande, à savoir soit la valeur EFF $\langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2}$, qui est la valeur de DGD EFF sur cette plage de fréquence, soit la valeur MOYENNE $\langle \Delta\tau \rangle$, qui est la moyenne (linéaire) de la valeur de DGD sur cette même plage de fréquence. En principe, la valeur de DGD moyenne (EFF $\langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2}$ ou MOYENNE $\langle \Delta\tau \rangle$) ne subit pas de grandes modifications pour une fibre donnée, d'un jour à l'autre ou d'une source à l'autre, à la différence des paramètres $\delta\tau$ ou $\Delta\tau$. De plus, la valeur de DGD moyenne constitue un moyen de prévision utile de l'exécution d'une transmission.

Le terme "PMD" est utilisé à la fois dans un sens général désignant deux modes de polarisation ayant des vitesses de groupes différentes (un ayant la vitesse la plus élevée et correspondant au temps d'arrivée le plus précoce, l'autre ayant la vitesse la plus faible et correspondant au temps d'arrivée le plus tardif, la différence entre les deux temps d'arrivée constituant le DGD), et dans le sens spécifique de la valeur de la valeur de DGD moyenne (EFF $\langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2}$ ou MOYENNE $\langle \Delta\tau \rangle$). Le sens spécifique définit purement et simplement la PMD pour les besoins du présent document. Bien que le DGD $\Delta\tau$ ou l'élargissement d'impulsion $\Delta\delta$ soit de préférence moyenné sur la fréquence, il peut, dans certaines situations, être moyenné sur la durée ou la température. Il existe deux métriques du DGD moyenne, c'est-à-dire la PMD:

$$PMD_{\text{MOYENNE}} = \langle \Delta\tau \rangle \quad (1)$$

$$PMD_{\text{EFF}} = \langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2} \quad (2)$$

L'expression de l'équation (1) est la définition de la PMD en matière de moyenne linéaire des valeurs de DGD. L'expression de l'équation (2) est la définition de la PMD en matière de moyenne efficace des valeurs de DGD.

Pour de nombreuses liaisons, les valeurs de DGD suivent une distribution aléatoire proche de la distribution de Maxwell. Sur l'hypothèse d'une correspondance exacte entre les valeurs et la distribution Maxwell, la relation entre les deux métriques, la valeur moyenne linéaire de DGD et la valeur efficace de DGD est donnée par l'équation (3).

$$\langle \Delta\tau \rangle = \left(\frac{8}{3\pi} \right)^{1/2} \langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2} \quad (3)$$

NOTE L'équation (3) s'applique si la distribution des valeurs de DGD est maxwellienne. Cette hypothèse peut être fautive en présence d'éléments hautement biréfringents (par rapport au reste de la liaison) dans le chemin optique. Un multiplicateur de 3 à 3,7 (voir l'IEC TR 61282-3), qui dépend des limites de probabilité acceptées par le propriétaire de la liaison, est appliqué à la valeur PMD_{MOY} pour déterminer le DGD maximal, qui est spécifié pour les liaisons conformes aux normes UIT-T. Ce multiplicateur repose sur une hypothèse de Maxwell et reflète une très longue queue de cette distribution. Si la liaison comporte un élément hautement biréfringent, les valeurs métriques PMD_{MOY} et PMD_{EFF} augmentent toutes les deux par rapport à la queue réelle de la distribution du DGD (ce qui signifie qu'un multiplicateur réduit peut être utilisé), mais l'équation (3) n'est pas maintenue parce que la distribution du DGD commence à ressembler à une distribution fondée sur la racine carrée d'une distribution du khi carré non-centrale avec trois degrés de liberté. Dans ces cas, la valeur PMD_{EFF} est généralement plus large que la valeur PMD_{MOY} donnée par l'équation (3). Cette condition est représentée par des enveloppes des franges à "sommets plats" à partir des méthodes de mesure dans le domaine temporel comme la méthode C et par des distributions du DGD bimodales à partir des méthodes de mesure dans le domaine fréquentiel comme la méthode B.

L'opérateur de valeur attendue dans les équations ci-dessus se rapporte à la valeur attendue à long terme sur toutes les longueurs d'onde. Dans la pratique, une plage de longueurs d'onde finie pour une condition et un instant particuliers est échantillonnée et une moyenne des données est calculée. La valeur attendue de ces moyennes calculées est égale aux valeurs attendues à long terme, en considérant par hypothèse une ergodicité sur le temps, les longueurs d'onde et les conditions. Si cette hypothèse est fausse, le résultat dépend des longueurs d'onde particulières échantillonnées. Dans le cas de conditions ergodiques, la reproductibilité de la mesure dépend de la plage de longueurs d'onde et du niveau de la PMD [1].

NOTE Ergodique: se dit d'un processus ou se rapporte à un processus dans lequel chaque séquence ou chaque échantillon qui peut être dimensionné représente également l'ensemble.

5 Méthodes de mesure

5.1 Méthodes de mesure de la PMD

5.1.1 Généralités

Sept méthodes élémentaires de mesure de la PMD sont présentées. Des informations détaillées spécifiques aux méthodes A, B et C sont présentées dans les annexes normatives. Des informations détaillées spécifiques aux méthodes D, E et F sont présentées dans les annexes informatives. Les méthodes A, B, C et G ont une large application commerciale et ont été mises en œuvre dans les équipements d'essai sur site. Les méthodes A, B et C sont également applicables à l'essai des fibres et câbles dans un environnement en usine, comme cela est détaillé dans l'IEC 60793-1-48:2007. Pour certaines méthodes, plusieurs approches sont également proposées pour analyser les résultats mesurés.

- Méthode A Analyseur fixe (FA)
 - Transformée de Fourier (FT)
- Méthode B Évaluation des paramètres de Stokes (SPE)
 - Analyse des vecteurs propres de la matrice de Jones (JME)
 - Analyse de la sphère de Poincaré (PSA)
- Méthode C Interférométrie (INTY)
 - Analyse traditionnelle (TINTY)
 - Analyse générale (GINTY)
- Méthode D Évaluation des paramètres de Stokes utilisant la lumière rétroréfléchie
 - Analyse des vecteurs propres de la matrice de Jones (JME)
 - Analyse de la sphère de Poincaré (PSA)
- Méthode E Déphasage modulé
 - Recherche complète
 - Analyse de l'ensemble de Mueller
- Méthode F Déphasage par polarisation (PPS)
- Méthode G Analyse OTDR et SOP par balayage de longueur d'onde (WSOSA)
 - Analyse DGD
 - Analyse PMD

Chaque méthode présente certains avantages et certains inconvénients. Ces avantages et inconvénients sont analysés de manière plus détaillée à l'Article 7.

5.1.2 Méthode A: Analyse fixe avec transformée de Fourier (FA-FT)

La méthode A exige uniquement un SOP en entrée d'une source à large bande ou d'une source laser accordable, selon la mise en œuvre. Un analyseur fixe est utilisé pour suivre la variation relative de la puissance d'un élément des vecteurs de Stokes en fonction de la longueur d'onde. Lorsqu'une transformée de Fourier est appliquée à ces données, le résultat est un demi-interférogramme virtuel, qui est évalué d'une manière similaire à la méthode C (TINTY).

5.1.3 Méthode B: Évaluation des paramètres de Stokes (SPE)

La méthode B mesure $\Delta\tau(\omega)$ en déterminant une réponse polarimétrique à une variation de la lumière à bande étroite dans une plage de longueurs d'onde. Pour chaque longueur d'onde, trois états de polarisation (SOP) connus distincts, par exemple des SOP linéaires, positionnés de façon nominale à 0°, 45° et 90° (orthogonaux sur la sphère de Poincaré), doivent être injectés et le vecteur de Stokes de sortie émis par la liaison est mesuré.

La variation de ces vecteurs de Stokes en fonction de la fréquence optique angulaire (longueur d'onde) ω et en fonction de la variation du SOP en entrée permet d'obtenir le DGD en fonction de la longueur d'onde, par le biais de relations fondées sur les définitions suivantes:

$$\frac{d\hat{s}(\omega)}{d\omega} = \hat{\Omega}(\omega) \times \hat{s}(\omega) \quad (4)$$

$$\Delta\tau(\omega) = \left| \hat{\Omega}(\omega) \right| \quad (5)$$

où

$\hat{s}$ est le vecteur de Stokes de sortie à la fréquence optique angulaire ω ;

$\hat{\Omega}$ est le vecteur PSP, appelé également vecteur de dispersion de polarisation (PDV – *polarization dispersion vector*) à la fréquence optique angulaire ω ;

$\Delta\tau$ est le DGD à la fréquence optique angulaire ω .

La JME est appliquée en transformant les vecteurs de Stokes de sortie en matrices de Jones [2], en combinant de façon appropriée les matrices à des longueurs d'onde voisines et le calcul des valeurs propres du résultat, puis en appliquant une formule d'argument pour obtenir le DGD à la fréquence de base.

La méthode d'analyse de la sphère de Poincaré (PSA) est appliquée en effectuant un calcul algébrique matriciel sur les vecteurs de Stokes de sortie normalisés pour déduire le vecteur de Stokes de sortie associé à la biréfringence circulaire au niveau de longueurs d'onde voisines, puis en appliquant une formule en Arc sinus pour obtenir le DGD à la fréquence de base.

Pour les deux méthodes d'analyse des valeurs propres de la matrice de Jones et de la sphère de Poincaré (JME et PSA), la moyenne des valeurs de DGD pour une plage de longueurs d'onde donnée donne la valeur de la PMD pour cette plage. Les méthodes d'analyse des valeurs propres de la matrice de Jones et de la sphère de Poincaré (JME et PSA) sont mathématiquement équivalentes. Lorsqu'une source à bande étroite est utilisée, il convient d'observer les précautions d'usage pour réduire le plus possible les réflexions optiques qui peuvent donner lieu à des phénomènes d'interférence cohérente.

En outre, dans le cas d'un système de mesure arithmique (par opposition à un système à balayage), la taille d'échelon de la source à bande étroite doit être sélectionnée avec soin conformément au spectre du DGD attendu (modification du DGD en fonction de la longueur d'onde). Des informations plus détaillées sur la sélection de la taille d'échelon sont données à

l'Article B.2. La largeur de raie de la source à bande étroite doit ensuite être ajustée à la taille d'échelon sélectionnée conformément au critère de Nyquist.

5.1.4 Méthode C: Méthode interférométrique

La méthode C est fondée sur une source lumineuse à large bande qui est polarisée pour un ou plusieurs SOP connus distincts. La corrélation croisée du champ électromagnétique émergent est déterminée par le diagramme d'interférence de la lumière en sortie. La caractérisation de ce diagramme est effectuée en calculant la largeur efficace de l'enveloppe de la corrélation croisée de l'interférogramme pour la méthode TINTY ou les largeurs efficaces des carrés de l'enveloppe de l'autocorrélation et de l'enveloppe de la corrélation croisée de l'interférogramme pour la méthode GINTY. Ces largeurs efficaces donnent la valeur de la PMD pour la plage de longueurs d'onde associée au spectre de la source (la largeur de bande de la source). La méthode C mesure uniquement la valeur PM_{DEFF} .

5.1.5 Méthode D: Évaluation des paramètres de Stokes utilisant la lumière rétroréfléchie

La méthode D est en principe identique à la méthode B, mais les vecteurs de Stokes de sortie réfléchis par l'extrémité de la liaison vers la source sont mesurés pour obtenir les valeurs de DGD. Le calcul de la valeur de la PMD pour une bande donnée utilise une formule modifiée qui prend en compte la réflexion. Puisque la réflexion est exigée, la méthode ne convient pas aux liaisons contenant des isolateurs (présents souvent dans les amplificateurs optiques). Il convient également d'observer les mêmes précautions que dans tous les autres cas lorsqu'une source lumineuse à bande étroite est utilisée afin d'éviter les phénomènes d'interférence cohérente et les phénomènes d'étalon de Fabry-Pérot qui peuvent entraîner une lecture erronée du DGD. Ces phénomènes entraînent des retards qui sont enregistrés dans tous les cas. Les résultats provenant des ouvrages de référence [12] démontrent que la méthode D est limitée à des distances de l'ordre de 40 km, sauf si un réflecteur est placé à l'extrémité de l'installation pour améliorer l'intensité de la lumière réfléchie.

5.1.6 Méthode E: Technique de déphasage modulé

La méthode E mesure la différence de phase entre deux SOP en entrée ou plus pour une source lumineuse à bande étroite modulée. La technique de recherche complète exige d'injecter une paire alternative d'états de polarisation en entrée orthogonaux pour obtenir un déphasage donné. L'axe de cette paire varie sur l'ensemble de la sphère de Poincaré afin d'obtenir le déphasage maximal. La différence de déphasage maximale déterminée est utilisée pour déduire le DGD au niveau de la longueur d'onde centrale du spectre de la source. La technique de l'ensemble de Mueller [3] exige l'injection de quatre SOP par longueur d'onde (spectre de la source), qui représente un ensemble de Mueller. L'analyse des déphasages associés à ces SOP donne une valeur de DGD pour la longueur d'onde. Lorsque la mesure est réalisée pour un certain nombre de longueurs d'onde dans une plage de longueurs d'onde, la moyenne des valeurs de DGD donne la valeur de la PMD pour cette plage.

5.1.7 Méthode F: Déphasage par polarisation (PPS)

La méthode F mesure les différences de phase entre différents SOP connus distincts tels que les SOP en entrée linéaires et orthogonaux, comme c'est le cas pour la méthode E. Sa seule différence avec la méthode E est que seuls deux SOP en entrée orthogonaux sont exigés. Toutefois, des résultats pour deux longueurs d'onde sont de ce fait exigés pour calculer une seule valeur de DGD.

5.1.8 Méthode G: Analyse OTDR et SOP par balayage de longueur d'onde (WSOSA)

La méthode G utilise un OTDR avec un laser accordable pour injecter deux impulsions de lumière à la liaison en essai, et ce, à des longueurs d'onde proches par un brouilleur de polarisation. Les impulsions de lumière réfléchie de l'extrémité éloignée de la liaison en essai traversent le brouilleur de polarisation lors de leur retour vers l'OTDR et un répartiteur de faisceau de polarisation est utilisé pour diriger les différents composants de polarisation vers une paire de détecteurs. La différence entre les niveaux de signal à la position des deux

détecteurs est mesurée puis est comparée entre les deux longueurs d'onde. Ce processus peut être répété pour nombre de SOP en entrée/sortie différents à chaque paire de longueurs d'onde et à de nombreuses paires de longueurs d'onde différentes afin d'évaluer la PMD sur une plage de longueurs d'onde représentative.

5.2 Structure du document

Des informations communes aux sept méthodes sont fournies aux Articles 1 à 13, et des exigences relatives à chaque méthode individuelle figurent, respectivement, dans les Annexes A, B, C, D, E, F et G.

5.3 Méthode de mesure de référence

Il n'existe pas de méthode de mesure de référence (RTM) parce que chaque méthode possède ses propres applications optimales.

6 Configurations de mesure

6.1 Liaison passive par câblage

La liaison à soumettre à l'essai varie habituellement entre 10 km et 160 km, la plupart des longueurs d'un réseau à grande distance ne dépassant généralement pas 80 km, et avec une perte inférieure à 22 dB à 1 550 nm. Ces longueurs sont normalement constituées de nombreux tambours de câble, de longueur individuelle comprise entre 2 km et 10 km, et dont les extrémités sont épissurées bout à bout (voir la Figure 1).



Figure 1 – Configuration type d'une liaison passive par câblage

Cette configuration signifie que la liaison peut être considérée comme comportant un "couplage de mode aléatoire" (RMC). Il est également vraisemblable que le "filage" des fibres installées après l'année 2000 (de nombreuses fibres étant installées avant cette date) introduise un couplage de mode supplémentaire.

Normalement, la terminaison des fibres s'effectue au niveau des tableaux de raccordement par épissurage des fibres amorce afin de fournir des interfaces de raccordement au droit des répartiteurs optiques (ODF – *optical distribution frames*) dans des bâtiments.

Toutes les méthodes d'essai peuvent être appliquées avec succès sur ce type de configuration de mesure, sous réserve que l'étendue dynamique de la mise en œuvre soit suffisante et que la PMD se situe dans l'étendue de mesure du système. Généralement, la PMD totale d'une liaison se situe entre 0,1 ps (par exemple, 10 km à 0,03 ps/√km) et 12 ps (par exemple, 160 km à 1 ps/√km).

6.2 Liaison incluant des amplificateurs

Un système DWDM peut être opérationnel sur une liaison qui inclut des amplificateurs (voir la Figure 2). Si le système doit être amélioré afin de fonctionner à un débit binaire plus élevé, par exemple, alors il peut être nécessaire de vérifier par essai la PMD de la liaison complète incluant les amplificateurs.

Ce type de liaison se situe généralement entre 100 km et 2 000 km pour les systèmes terrestres et peut s'étendre jusqu'à 6 500 km pour les câbles sous-marins transatlantiques et 13 000 km pour les câbles sous-marins transpacifiques.

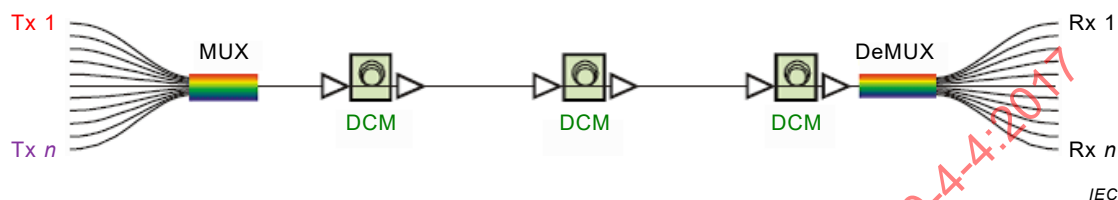


Figure 2 – Exemple de configuration de liaison incluant des amplificateurs

À l'exception des méthodes D et G, toutes les méthodes décrites dans le présent document peuvent être utilisées pour mesurer la PMD dans la bande de gain de liaisons qui incluent des amplificateurs optiques par pompage. Les méthodes D et G reposent sur les réflexions de l'extrémité éloignée de la liaison en essai. Les amplificateurs comportent habituellement des isolateurs optiques qui bloquent tout trajet de la lumière dans le sens inverse.

6.3 Liaison incluant les modules de compensation de dispersion chromatique

6.3.1 Généralités

Comme le représente la Figure 2, il est vraisemblable qu'une liaison à longue distance qui contient des amplificateurs comporte également des modules de compensation de dispersion chromatique.

Un DCM fondé sur les fibres contient généralement une fibre de compensation de dispersion (DCF) de grande longueur (de nombreux kilomètres) comprenant une dispersion chromatique fortement négative afin de neutraliser la dispersion chromatique positive d'une longueur de fibre de transmission type. Ce DCM peut introduire des quantités significatives de PMD et il convient par conséquent de l'inclure dans la configuration de mesure.

Les méthodes d'essai qui peuvent être utilisées sur des liaisons amplifiées peuvent également être utilisées sur des liaisons qui contiennent des DCM fondés sur des fibres.

6.3.2 DCM fondé sur un réseau

L'application des DCM qui utilisent des réseaux de Bragg sur fibres modulées est de plus en plus fréquente au détriment des DCM fondés sur fibres. L'applicabilité des méthodes d'essai aux liaisons qui contiennent des FBG est destinée à faire l'objet d'une étude complémentaire.

6.4 Liaison incluant des ROADM

6.4.1 Généralités

De nombreux réseaux sont désormais constitués de multiplexeurs optiques d'insertion-extraction reconfigurables (ROADM). Il s'agit d'éléments de réseaux qui permettent l'acheminement de différentes longueurs d'onde d'un système DWDM vers des destinations différentes tout en restant dans le domaine optique. Les ROADM sont généralement des dispositifs complexes qui comprennent de nombreux éléments fonctionnels, y compris des amplificateurs et des commutateurs sélectifs en longueur d'onde (WSS), qui entraînent un

filtrage optique intense au voisinage des longueurs d'onde de fonctionnement. La présence de ces éléments peut limiter le choix de la méthode d'essai. Par exemple, la présence d'amplificateurs évite l'utilisation des méthodes D et G. La partie TINTY de la méthode C exige un spectre continu et ne peut donc pas être utilisée en raison du filtrage.

Toutefois, il peut être possible de mesurer la PMD et/ou le DGD dans les configurations de mesure suivantes.

6.4.2 Configuration point à point multicanaux

Si les ROADMs sont réglés pour acheminer plusieurs longueurs d'onde entre deux emplacements, alors la méthode A et la partie GINTY de la méthode C peuvent être utilisées dans les bandes passantes d'un ensemble de longueurs d'onde, et la méthode B peut être utilisée en réglant une source laser accordable sur les longueurs d'onde DWDM pour lesquelles le ROADM est conçu.

6.4.3 Configuration monocanal

Selon la configuration ROADM, il peut être possible de mesurer le DGD dans la bande passante d'un canal unique, par exemple en utilisant soit la méthode B, soit la méthode E.

7 Considérations de mesure

7.1 Généralités

La réalisation de mesures PMD sur une installation câblée implique de nombreuses considérations susceptibles d'affecter le choix de la technique de mesure et l'exactitude des résultats obtenus. L'Article 7 présente certaines de ces questions, ainsi que leur influence sur la mesure. L'IEC TR 61282-9 doit permettre de fournir des descriptions exhaustives des questions qui influent sur le choix des méthodes de mesure.

7.2 Plage de longueurs d'onde

Généralement, plus l'étendue de mesure des longueurs d'onde est grande, plus le résultat est exact – appelé incertitude Gisin [1].

La méthode E peut donner des résultats du DGD pour la largeur de bande optique occupée la plus étroite, mais elle exige que le DGD de la liaison soit supérieur de 0,5 ps environ. L'exigence de largeur de bande relative aux méthodes B, D et F est supérieure à celle de la méthode E parce qu'une différenciation numérique des données de sortie collectées pour deux longueurs d'onde proches est exigée. Toutefois, ces méthodes permettent de mesurer le DGD au plus petit des niveaux. La méthode A ou la méthode C ne fournit pas de mesure de chaque valeur de DGD, mais fournit en revanche la valeur efficace de DGD (PMD_{EFF}) sur les longueurs d'onde du spectre de la source.

La méthode F est similaire à la méthode E lorsque cette dernière est mise en œuvre par l'approche des matrices de Mueller. Toutefois, la méthode F exige des mesures à deux longueurs d'onde adjacentes afin d'obtenir une valeur de DGD, de manière similaire aux méthodes B et D.

7.3 Étendue de mesure de la PMD

Certaines méthodes d'essai comportent une limite supérieure ou inférieure de la quantité de PMD qu'elles sont capables de mesurer, selon la mise en œuvre spécifique. Prendre en considération, par exemple, les éléments suivants:

- La PMD minimale qui peut être mesurée avec la méthode A est déterminée par le domaine spectral de la mesure comme étant égale à 0,1 ps généralement, à moins qu'un écart de DGD ne permette de supprimer cette limite.

- La PMD maximale qui peut être mesurée avec la méthode A est déterminée par la résolution spectrale du système de détection. Cette limite peut être supérieure ou égale à 80 ps en cas d'utilisation d'un analyseur de spectre à haute résolution.
- La PMD minimale qui peut être mesurée avec la méthode C (TINTY) est déterminée par la largeur spectrale de la source utilisée. Plus la source est large, plus la PMD qui peut être mesurée est faible. Les limites types s'établissent à 0,1 ps environ.
- La PMD maximale qui peut être mesurée avec la méthode C est limitée par la plage de déplacement du miroir dans l'interféromètre. Les limites types s'établissent à 100 ps.

7.4 Étendue dynamique de mesure

Il est nécessaire de vérifier que le système de mesure est capable de mesurer la perte attendue de la configuration de liaison. Plus particulièrement, les techniques de mesure à extrémité unique (D et G) qui reposent sur un signal réfléchi de l'extrémité éloignée de la liaison sont susceptibles de présenter une étendue dynamique faible. La fixation d'une terminaison réfléchissante à l'extrémité éloignée de la liaison en essai permet d'améliorer les performances de ces systèmes.

Il convient que toute source lumineuse à large bande utilisée ait une densité spectrale de puissance suffisante pour la mesure à effectuer.

L'étendue dynamique de certaines techniques de mesure (par exemple, méthode C) peut être réduite en présence de quantités de PMD plus grandes.

7.5 Déplacement de la fibre

Les méthodes A, B, D, E, F et G peuvent reposer sur des mesures qui peuvent être interrompues si la liaison vibre, comme dans le cas des câbles aériens, si les propriétés optiques de la fibre varient pendant la période de mesure des données pour le calcul de chaque valeur de DGD. Des taux de mesure rapides ont été mis en œuvre dans certains systèmes d'essai sur site du commerce afin de réduire cet effet. Il a été démontré que les méthodes A, B et G donnent des performances satisfaisantes lors d'un essai sur site dans différents environnements d'installation [4], [5]. Les données issues de cet essai portant sur le taux de variation du SOP ont démontré que des câbles souterrains pouvaient également être soumis à des transitoires soudains du SOP, et que de nombreux facteurs environnementaux pouvaient provoquer une variation du SOP, y compris une vibration induite par la fréquence de 50 Hz du courant alternatif sur les fibres fixées sur les tracés de réseaux d'alimentation [6].

La méthode C peut être utilisée en cas de déplacement de la fibre, en raison de sa source à large bande et de l'interférométrie, pour déduire la PMD de l'enveloppe de la corrélation croisée dans le domaine temporel de l'interférogramme mesuré.

7.6 Brouillage des SOP en entrée et en sortie

7.6.1 Généralités

La réalisation de mesures répétées avec variation de l'état de polarisation en entrée (et/ou en sortie) entre les mesures permet d'améliorer la base statistique de certaines méthodes d'essai PMD (méthodes A, C et G). Cette disposition peut contribuer à améliorer la certitude des mesures, notamment pour des faibles niveaux de PMD.

7.6.2 Polariseurs/brouilleurs

Physiquement, le brouillage des SOP consiste à insérer des polariseurs qui peuvent être commandés, un au niveau de l'entrée et un au niveau de la sortie du dispositif en essai, de telle sorte que différents SOP en entrée et axes de l'analyseur sont définis pour un balayage de mesure. Plusieurs SOP en entrée et en sortie peuvent être sélectionnés pour obtenir un ensemble de mesures plus complet que ce qui est possible dans le cas d'une configuration à un seul état de polarisation (SOP) en entrée et en sortie. Bien qu'une mesure obtenue à partir d'une seule configuration soit une possibilité qui n'exige pas de brouilleur, la mise en œuvre de

plusieurs configurations améliore la fidélité du résultat pour une valeur de PMD égale, par exemple, au résultat de la méthode B. Plusieurs configurations d'analyseur peuvent également être utilisées pour obtenir plusieurs configurations (voir C.2.1.3). Conceptuellement, le processus de brouillage peut être perçu de la manière suivante:

- le polariseur d'entrée suivi du brouilleur se comporte comme une seule unité, un polariseur équivalent dont l'axe est défini au niveau de n'importe quel point sur la sphère de Poincaré afin de définir le SOP en entrée;
- le brouilleur suivi de l'analyseur se comporte comme un analyseur équivalent dont l'axe est défini au niveau de n'importe quel point sur la sphère afin de définir le SOP en sortie.

Un ensemble de combinaisons d'axes de l'analyseur et de SOP en entrée est représenté par un SOP en entrée et en sortie. Ce processus a pour objectif d'obtenir un ensemble de mesures sur des SOP en entrée et en sortie uniformément répartis. Dans la pratique, il existe différentes façons d'atteindre cet objectif comme cela est présenté ci-dessous.

7.6.3 Ensemble de Mueller à 9 états

La somme des neuf carrés des enveloppes observées avec neuf SOP en entrée et en sortie spécifiques est rigoureusement égale à la moyenne des carrés de l'enveloppe brouillée uniformément. Ces neuf SOP en entrée et en sortie sont trois axes d'analyseur formant un trièdre à angle droit, pour chacun des trois SOP en entrée formant également un trièdre à angle droit.

7.6.4 Brouillage aléatoire

Le brouillage aléatoire des SOP en entrée et en sortie a été mis en œuvre de différentes façons, y compris les suivantes.

- Brouillage par balayages successifs: configuration automatique et manuelle des brouilleurs pour chaque balayage.
- Brouillage continu: pour certaines méthodes de mesure y compris la méthode C, lorsque les carrés des enveloppes sont additionnés, le brouillage peut être effectué pendant le balayage. Des brouilleurs automatisés sont réglés pour couvrir de manière continue la sphère en fonction du temps.
- Brouillage rapide à un seul balayage: pour certaines méthodes de mesure y compris la méthode C, si les brouilleurs sont suffisamment rapides, les carrés des enveloppes parfaitement brouillées peuvent être observés en seul balayage. Toutefois, cette technique exige des dispositions particulières pour éviter la diaphonie entre la partie en courant alternatif et la partie en courant continu précédente de l'interférogramme.

7.7 Perte dépendant de la polarisation

Aucune méthode ne convient à la mesure de la PMD de liaisons présentant une perte dépendant de la polarisation (PDL) supérieure à 10 dB. Les liaisons dont les valeurs de la PDL sont inférieures à 1 dB peuvent être mesurées avec une exactitude raisonnable. L'exactitude de mesure peut être compromise par une PDL supérieure à 1 dB.

7.8 Considérations concernant les amplificateurs

7.8.1 Généralités

Lorsque la liaison à soumettre à l'essai inclut des amplificateurs optiques, plusieurs éléments sont pris en considération, dont la plupart se rapportent à la présence d'amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA – *Erbium-doped fibre amplifiers*).

7.8.2 Isolateurs optiques

La plupart des amplificateurs comportent des isolateurs optiques qui bloquent tout trajet de la lumière dans le sens inverse, ce qui signifie que les méthodes d'essai à une seule extrémité ne peuvent pas être utilisées.

7.8.3 Plage de longueurs d'onde

Les amplificateurs ne comportent qu'une plage limitée de longueurs d'onde de fonctionnement, couramment la bande C seule (ou parfois la bande L). Toutes les mesures doivent être réalisées dans cette plage de longueurs d'onde, ce qui peut limiter certaines mises en œuvre de certaines méthodes d'essai.

7.8.4 Niveaux de puissance

Il est important que les signaux d'essai soient compatibles avec les niveaux de puissance de fonctionnement prévus des amplificateurs de la liaison.

7.8.5 Bruit de l'émission spontanée amplifiée (ASE)

Lors de l'essai des liaisons comportant des amplificateurs, le bruit de l'émission spontanée amplifiée (ASE – *amplified spontaneous emission*) peut générer une énergie spectrale dépolarisée au voisinage de la longueur d'onde de mesure. Ce phénomène réduit généralement l'exactitude de la mesure. Pour les méthodes A, B, C, E et F, cet effet peut être modéré en installant un filtre optique ou électrique au niveau de l'extrémité du récepteur. Toutefois, un filtre optique ne supprime pas l'ASE juste sous le spectre du signal. L'exactitude est alors limitée par un plus faible degré de polarisation (DOP), s'il n'est pas possible de réduire suffisamment la largeur spectrale du filtre comme c'est le cas avec une source à large bande. Un DOP plus faible peut exiger que le signal à intégrer soit plus long pour être significatif, ou le résultat devient trop bruité et l'interprétation est erronée.

7.9 Considérations concernant l'emplacement des équipements

Dans le cas des méthodes A et C, la source et le récepteur se situent généralement aux extrémités opposées de la liaison, mais une coordination active de la source et du récepteur n'est pas nécessaire pendant une mesure.

Les méthodes B, E et F exigent une liaison de communication et une coordination entre la source et le récepteur pendant une mesure, ce qui exige un canal de communication supplémentaire. La liaison elle-même peut également être utilisée pour ce canal.

Dans le cas des méthodes D et G, tous les appareils de mesure se situent au même emplacement à une extrémité de la liaison en essai, mais une attention particulière est nécessaire à l'extrémité distante pour vérifier qu'une réflexion appropriée peut être obtenue. Cette disposition peut exiger la fixation d'une terminaison réfléchissante à l'extrémité distante.

8 Appareillage

8.1 Généralités

L'appareillage suivant est commun à toutes les méthodes de mesure. Les Annexes A, B, C, D, E, F et G contiennent des dessins ainsi que d'autres exigences applicables aux équipements respectivement utilisés dans chacune des sept méthodes.

Toutes ces méthodes exigent des sources lumineuses contrôlées pour un ou plusieurs états de polarisation (SOP) connus distincts. Toutes ces méthodes exigent l'injection de lumière dans une région spectrale afin d'obtenir une valeur de la PMD qui soit caractéristique de cette région (par exemple, bande C, bandes C+L, bandes S+C+L).

Les méthodes diffèrent sur les points suivants:

- les caractéristiques spectrales de la source;
- les caractéristiques de la largeur de bande du système de détection;
- les caractéristiques physiques qui sont réellement mesurées; et
- les méthodes d'analyse.

Tous les éléments de transmission de l'appareillage peuvent avoir un effet sur la PMD mesurée. Il est essentiel de sélectionner ces éléments pour leurs valeurs maximales de DGD et de PDL les plus petites possible dans le même domaine spectral de la mesure de la PMD. Il peut être nécessaire d'évaluer l'influence globale de ces éléments en effectuant une mesure sur une petite longueur (par exemple 2 m) d'une fibre présentant une faible PMD. Lorsque l'influence de ces éléments sur la PMD est importante, une possibilité consiste à soustraire, en quadrature, la valeur de la PMD du système de mesure de la valeur de la PMD de la liaison mesurée avant de consigner une valeur finale.

8.2 Source lumineuse et polariseurs

Se reporter aux Annexes A, B, C, D, E, F et G pour les choix détaillés des caractéristiques spectrales de la source lumineuse. La source doit générer un rayonnement suffisant à la ou aux longueurs d'onde prévues et son intensité doit être stable pendant une période suffisamment longue pour effectuer la mesure. Il convient par ailleurs qu'elle couvre la plage de longueurs d'onde exigée pour déterminer la PMD pour la bande concernée.

Pour toutes les méthodes, la source lumineuse doit être polarisée pour un ou plusieurs SOP connus distincts avant son injection dans la liaison en essai. Des polariseurs, des dispositifs de réglage de la polarisation qui utilisent des lames à longueur d'onde, des lames à retard à cristaux liquides, des boucles de fibres biréfringentes à déplacement mécanique ou des dispositifs à cristaux électro-optiques peuvent être utilisés pour régler le SOP de la source au niveau de l'entrée de la liaison en essai, ainsi que l'axe de polarisation de l'analyseur au niveau de la sortie de la liaison en essai. Les performances du montage du dispositif de réglage de la polarisation peuvent être vérifiées en mesurant la puissance de sortie pour trois SOP linéaires connus distincts. Si les puissances de sortie sont situées à 3 dB les unes des autres, le montage du dispositif de réglage de la polarisation est adapté.

Pour les méthodes A, B, D (lorsqu'une source lumineuse accordable à bande étroite est utilisée), E, F et G, la largeur spectrale effective (spectre gaussien, largeur à mi-hauteur) de la source $\Delta\lambda$ doit être suffisamment étroite pour que la lumière provenant de la liaison reste polarisée dans toutes les conditions de mesure et pour toutes les valeurs de DGD mesurées. Un DOP supérieur ou égal à 90% est préférable, bien que des mesures puissent être effectuées avec des valeurs aussi faibles que 25 % avec une incertitude plus grande. La relation entre le DOP, la largeur spectrale $\Delta\lambda$ la longueur d'onde centrale, λ_0 et le DGD, $\Delta\tau$, est donnée par l'équation:

$$DOP(\%) = 100 \exp \left[- \frac{1}{4 \ln(2)} \left(\frac{\pi c \Delta\tau \Delta\lambda}{\lambda_0^2} \right)^2 \right] \quad (6)$$

8.3 Optique d'entrée

Un cordon d'essai connecté peut être utilisé pour injecter la lumière dans la liaison. Le reste de l'optique d'entrée précède ce cordon d'essai. La connexion doit être stable pendant toute la durée de la mesure. Si une variation du SOP pendant la mesure peut altérer la technique de mesure, alors il peut être nécessaire de fixer le cordon d'essai afin d'empêcher tout mouvement.

Pour les méthodes D et G, des exigences spéciales s'appliquent pour l'interface du cordon d'essai du système de mesure et la liaison de contrôle des réflexions (voir les Annexes D et G).

8.4 Extracteur de mode de gaine

Utiliser un dispositif qui extrait les modes de gaine de la fibre de la liaison. Dans la plupart des situations, le revêtement de la fibre remplit cette fonction.

8.5 Filtre de mode d'ordre élevé

Utiliser un moyen permettant d'éliminer des modes de propagation d'ordre élevé dans la plage de longueur d'onde souhaitée, qui est supérieure ou égale à la longueur d'onde de coupure de la liaison. L'IEC 60793-1-44 définit la mesure de la longueur d'onde de coupure d'une fibre unimodale. Par exemple, une boucle d'un rayon de 30 mm sur la fibre suffit généralement.

8.6 Connexion de sortie

Un cordon d'essai connecté peut être utilisé pour connecter la liaison à l'optique de sortie. Cette connexion doit être stable pendant toute la durée de la mesure. Si une modification du SOP pendant la mesure peut altérer la technique de mesure, alors il peut être nécessaire de fixer le cordon d'essai afin d'empêcher tout mouvement.

Pour les méthodes D et G, la lumière réfléchiée par l'extrémité éloignée de la liaison (par rapport à la source lumineuse) peut exiger une préparation spéciale de l'extrémité pour augmenter le plus possible la réflexion. Pour cette méthode, la sortie de la connexion est la même que la connexion d'entrée.

8.7 Optique de sortie

Voir l'Annexe appropriée (A, B, C, D, E, F ou G).

Certaines mesures de liaisons peuvent exiger d'utiliser la combinaison d'un amplificateur optique et d'un atténuateur variable dans le montage d'essai pour maintenir la puissance à un niveau correct pour le détecteur analyseur. Dans ce cas, un tel appareillage de réglage de la puissance est généralement placé juste avant le détecteur.

Pour les méthodes D et G, l'optique de sortie est située au même emplacement que l'optique d'entrée.

8.8 Détecteur

Pour la détection de signal, un détecteur optique linéaire et stable est utilisé sur la plage des intensités, des longueurs d'onde et des durées de mesure effective lors de la mesure. Un système type peut comprendre une détection synchrone par un amplificateur verrouillé à découpage, un wattmètre optique, un analyseur de spectre optique, un interféromètre ou un polarimètre. Pour utiliser l'ensemble du domaine spectral de la source, le système de détection doit comporter une plage de longueurs d'onde qui couvre les longueurs d'onde produites par la source lumineuse. Pour des informations détaillées supplémentaires, voir l'Annexe appropriée (A, B, C, D, E, F ou G).

8.9 Calculateur ou plate-forme d'essai

Utiliser un calculateur ou une plate-forme d'essai appropriée pour effectuer des opérations telles que la commande de l'appareillage, les mesures d'intensité et le traitement des données pour obtenir les résultats finaux.

8.10 Moyen de réduction des phénomènes d'émission spontanée amplifiée

L'ASE entraîne une dépolarisation de la lumière reçue. Selon la méthode et la mise en œuvre utilisées, les méthodes alternatives suivantes peuvent être utilisées:

- modulation du signal lumineux combinée à un filtre électrique dans les circuits électroniques de détection;
- filtre optique accordable verrouillé sur la longueur d'onde du signal, placé à la sortie de la liaison par fibre.

9 Échantillonnage et éprouvettes

Une éprouvette représente une des configurations de liaison énumérées à l'Article 6. À l'exception de la méthode C, il convient de mesurer la liaison lorsque des vibrations ou des variations de température sont réduites le plus possible pendant la période de la mesure. Il peut être nécessaire de contrôler l'étendue de toute variation du SOP afin de vérifier que les conditions sont suffisamment stables pour le système d'essai.

Si la liaison comporte des amplificateurs optiques, des ROADM ou d'autres dispositifs actifs, il convient de les mettre sous tension.

10 Procédure

- a) Préparer les extrémités de la liaison par un examen des extrémités du connecteur conformément à l'IEC 61300-3-35 et par nettoyage, lorsque cela est exigé, suivant la recommandation de l'IEC TR 62627-01. Pour les méthodes D et G, vérifier que la réflexion de l'extrémité éloignée du câblage en essai est suffisamment forte et, lorsque cela est exigé, fixer une terminaison réfléchissante. Pour la méthode D, une extrémité d'entrée optique de la fibre est exigée pour réduire le plus possible les réflexions provenant de l'extrémité d'entrée.

- b) Fixer les extrémités à l'optique d'entrée et à l'optique de sortie.

NOTE Pour les méthodes D et G, l'optique d'entrée et l'optique de sortie sont identiques. L'extrémité de la liaison à laquelle ces optiques sont fixées s'appelle extrémité d'entrée.

- c) Vérifier que l'intensité du signal est suffisante pour la mesure.
- d) Vérifier que la polarisation du signal est suffisante.
- e) Vérifier que la stabilité du SOP est suffisante pour la mesure à effectuer.
- f) Utiliser le calculateur ou la plate-forme d'essai pour effectuer les balayages et les mesures indiqués dans les Annexes A, B, C, D, E, F ou G pour les sept méthodes de mesure.
- g) Vérifier que le balayage de mesure est valable et présente les caractéristiques attendues.
- h) Mémoriser le balayage de mesure et remplir les documents exigés.
- i) Lorsque l'amélioration de la base statistique d'un ensemble de mesure l'exige, faire varier l'état de polarisation en entrée et en sortie et répéter la mesure autant de fois que l'obtention de l'incertitude de mesure nécessaire l'exige.

11 Calcul ou interprétation des résultats

Les Annexes A, B, C, D, E, F et G contiennent des calculs permettant de convertir les données mesurées en valeurs de PMD ou de DGD.

L'IEC TR 61282-3 fournit des informations sur le calcul de la PMD de la liaison en se fondant sur les statistiques des valeurs des composants et des fibres optiques.

12 Documentation

12.1 Informations exigées pour chaque mesure

- Liaison:
 - identification;
 - description, par exemple, la présence d'amplificateurs optiques ou d'autres composants;
 - longueur (km);
 - types de câbles et de fibres.
- Date de l'essai
- Résultats de l'essai:
 - valeur de la PMD comme PMD_{MOY} ou PMD_{EFF} ;
 - spectre et largeur de raie de la source lumineuse du montage d'essai;
 - DGD en fonction des longueurs d'onde et/ou des fréquences pour les méthodes B, D, E, F;
 - interférogramme pour la méthode C;
 - intensité en fonction des longueurs d'onde ou des fréquences et de la transformée de Fourier pour la méthode A;
 - pour un WSOSA – les informations détaillées des longueurs d'onde et incréments de longueurs d'onde utilisés pour la mesure.
- Plage de fréquences ou de longueurs d'onde sur laquelle la mesure est effectuée.

12.2 Informations à fournir

Les informations suivantes sont normalement traçables en consignait la marque, le modèle, le numéro de série et les informations détaillées applicables du module de l'équipement utilisé.

- Montage d'essai:
 - méthode de mesure;
 - méthode de calcul (analyse);
 - description de l'équipement:
 - caractéristiques détaillées de la source;
 - caractéristiques détaillées de l'analyseur;
 - autres accessoires éventuels utilisés.
 - étalonnage:
 - date du dernier étalonnage;
 - méthode d'étalonnage;
 - analyse de l'incertitude.
- Pour les méthodes B, D, E et G, le nombre de longueurs d'onde échantillonnées.
- Pour la méthode C, le type de technique de détection des franges.

13 Informations relatives à la spécification

- Plage de longueurs d'onde.
- Tout écart par rapport à cette procédure.

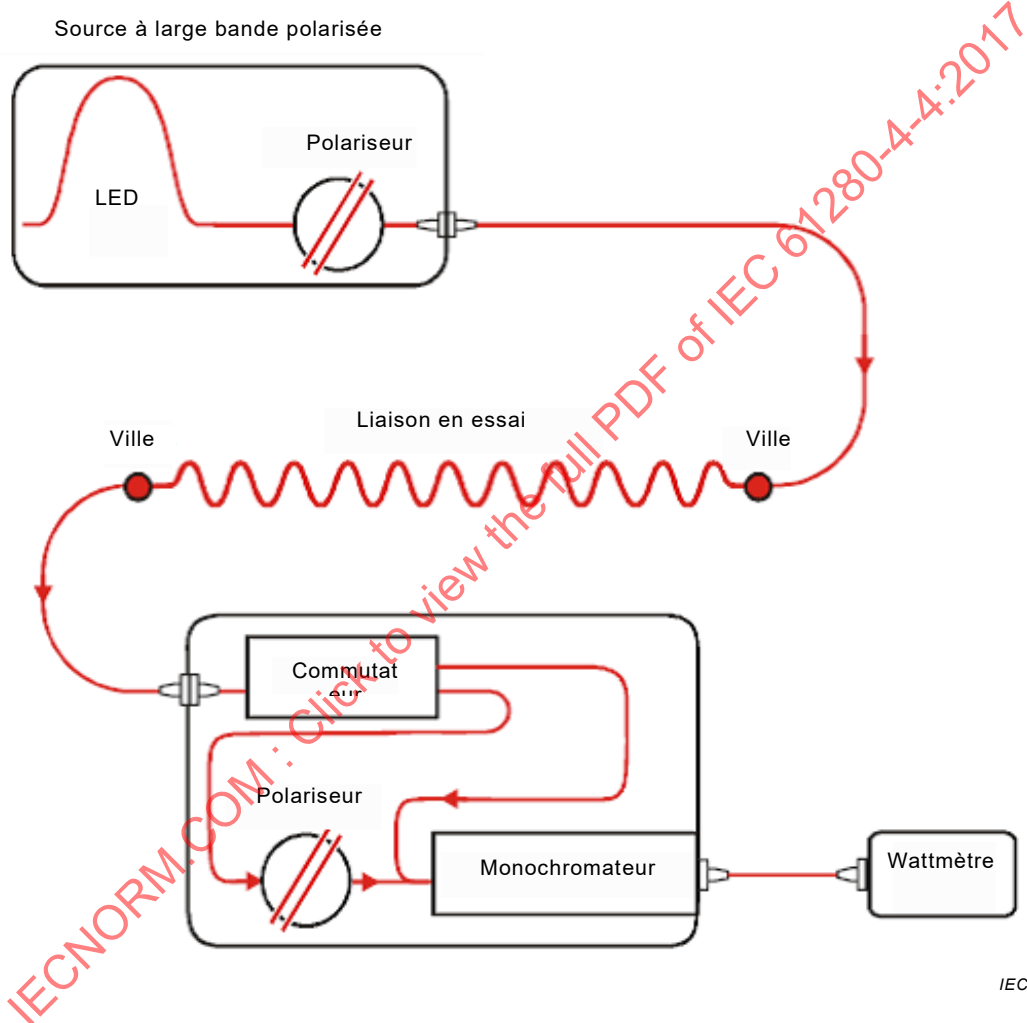
Annexe A (normative)

Méthode de l'analyseur fixe

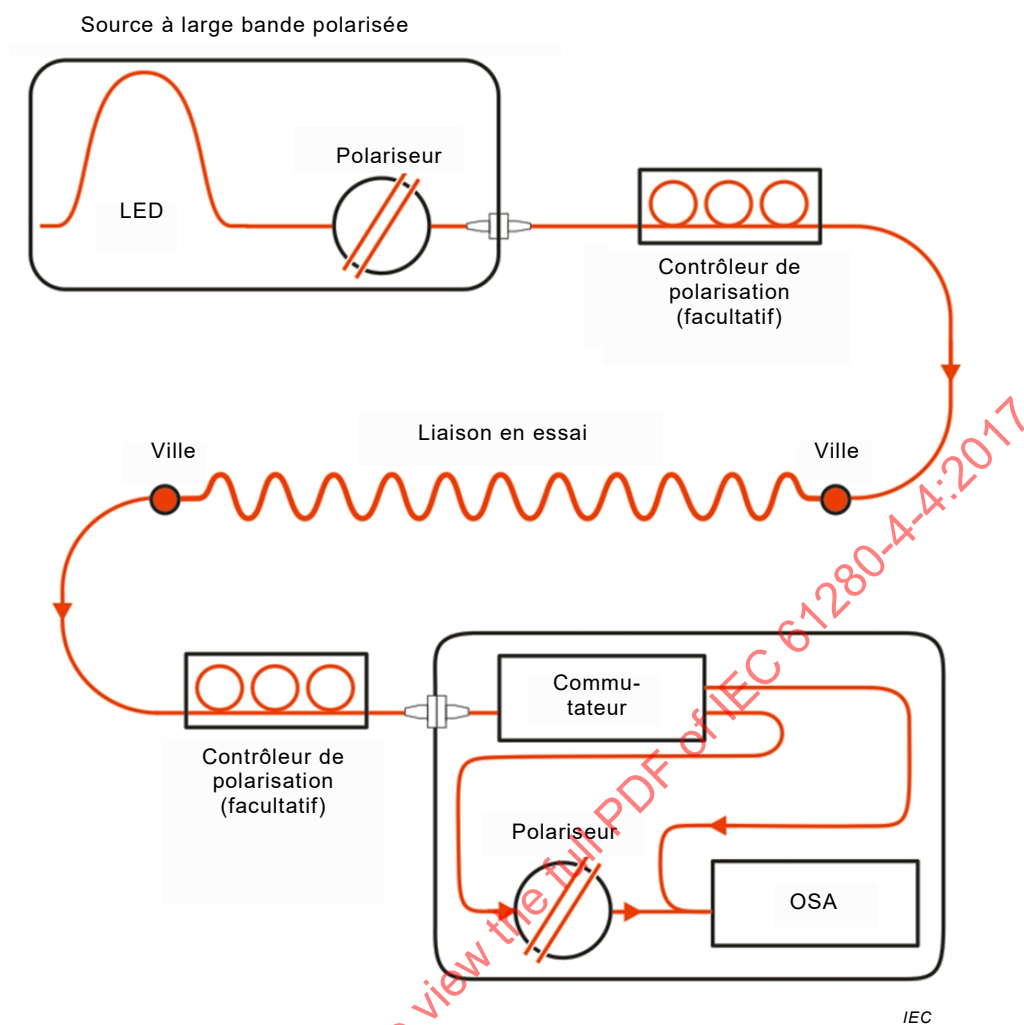
A.1 Appareillage

A.1.1 Schémas fonctionnels

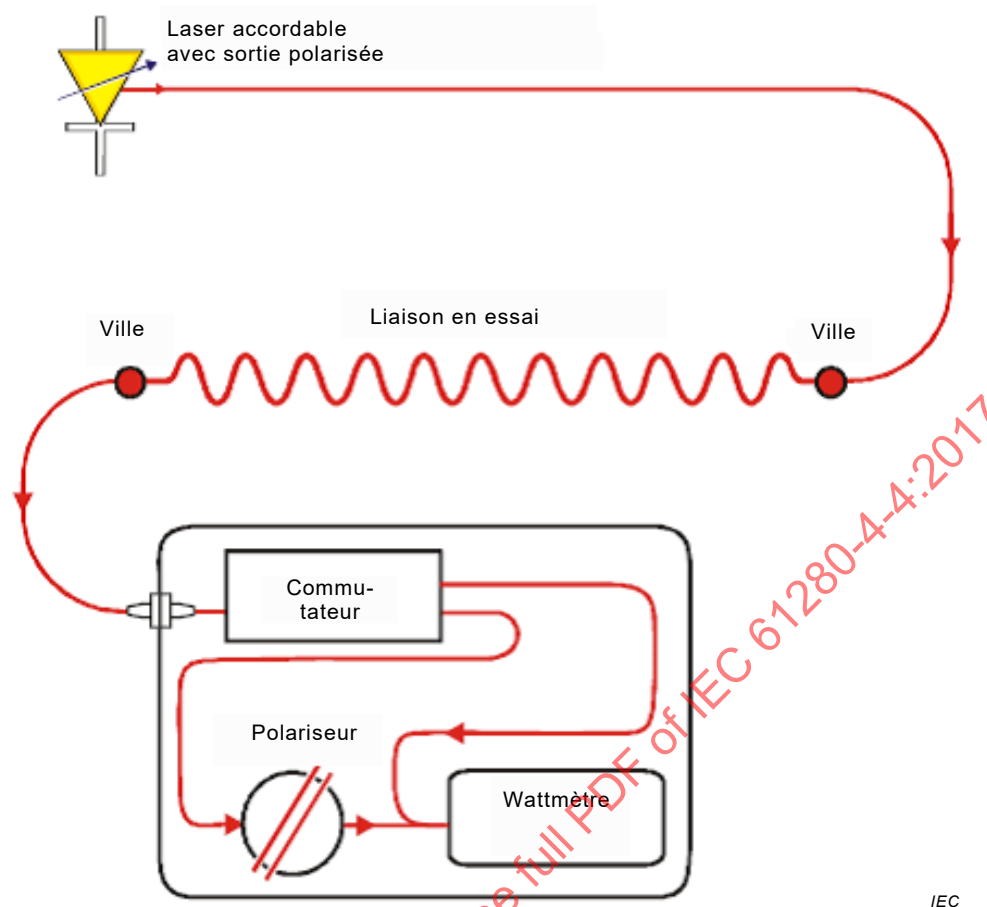
La Figure A.1 représente les schémas fonctionnels possibles.



(a) Montage utilisant une source à large bande et un monochromateur



(b) Montage utilisant une source à large bande et un analyseur de spectre optique (OSA – optical spectrum analyzer)



(c) Montage utilisant une source laser accordable

Figure A.1 – Schémas fonctionnels relatifs à l'analyseur fixe**A.1.2 Source lumineuse**

Dans tous les cas, deux types de sources lumineuses, à large bande ou à bande étroite, peuvent être utilisés selon le type d'analyseur. Une source à large bande telle que la combinaison LED/polariseur représentée à la Figure A.1(a) et à la Figure A.1(b) peut être utilisée; une source ASE peut être utilisée pour remplacer la LED. En variante, une source laser accordable à bande étroite peut être utilisée, tel que cela est représenté à la Figure A.1(c).

Noter que la technique de mesure implique un balayage de référence des niveaux de puissance présents en fonction de la longueur d'onde. Ainsi, la forme du contenu spectral de la source n'influe pas sur la mesure. Étant donné qu'aucune exigence ne s'applique concernant un spectre continu, cette technique peut également être appliquée aux systèmes contenant des filtres optiques (comme les ROADM).

Lorsqu'une source à large bande est utilisée, le choix des longueurs d'onde peut être effectué avec un analyseur à filtre passe-bande étroit tel qu'un analyseur de spectre optique, un monochromateur ou un interféromètre utilisé comme un analyseur de spectre par la transformée de Fourier placé avant l'analyseur. Dans le cas d'une source à large bande, la largeur du filtre est prise comme largeur spectrale pour les besoins des calculs.

Dans les deux cas, la largeur spectrale doit être suffisamment faible pour maintenir le DOP souhaité (voir 8.2), mais pas trop faible par rapport à la taille d'échelon sélectionnée pour éviter les phénomènes d'interférence cohérente inutiles et autres bruits parasites. Dans les deux cas, la plage de longueurs d'onde doit être suffisamment étendue pour permettre de mesurer la PMD avec une précision suffisante dans la zone de longueur d'onde spécifiée (voir A.3).

Pour vérifier que toutes les caractéristiques dans le spectre optique ont une résolution adéquate, il convient que la largeur spectrale satisfasse l'équation suivante:

$$\Delta\lambda/\lambda_0 < (8\nu\Delta\tau_{\max})^{-1} \quad (\text{A.1})$$

où

$\nu = c/\lambda$ est la fréquence optique;

$\Delta\lambda$ est la largeur spectrale;

$\Delta\tau_{\max}$ est le DGD maximal prévu.

Pour une longueur d'onde λ voisine de 1 550 nm, l'équation (A.1) se ramène à la condition à laquelle il convient que $\Delta\lambda$ (nm) soit inférieure à la réciproque de $\Delta\tau$ (ps).

A.1.3 Analyseur

L'orientation angulaire de l'analyseur n'est pas critique, mais il convient qu'elle reste fixe pendant toute la durée de la mesure. Avec un couplage de mode négligeable ou de faibles valeurs de PMD, un certain réglage de l'analyseur peut s'avérer utile pour augmenter le plus possible l'amplitude des oscillations représentées à la Figure A.2. Cette opération peut également s'effectuer par manipulation des cordons d'essai à l'entrée ou à la sortie afin d'ajuster l'état de polarisation du signal entrant dans le récepteur.

NOTE L'analyseur peut être remplacé par un polarimètre.

A.1.4 Contrôle facultatif de la polarisation à l'entrée et à la sortie de la liaison en essai

L'insertion de contrôleurs de polarisation à l'entrée et à la sortie de la liaison en essai est possible. Le calcul de la moyenne de plusieurs mesures effectuées pour différentes conditions d'injection de polarisation à l'entrée et à la sortie permet d'améliorer la précision de la mesure. Les variations de polarisation peuvent être aléatoires ou contrôlées, le facteur important étant l'obtention d'un ensemble représentatif d'états de polarisation sur la sphère de Poincaré. Les états de polarisation peuvent être modifiés entre deux balayages spectraux ou faire l'objet d'un balayage continu à une vitesse suffisamment faible par comparaison avec à la vitesse de balayage spectral.

Noter qu'il est également possible de générer une rotation de polarisation sur une plage de longueurs d'onde donnée au moyen d'un dépolariseur de Lyot placé à l'entrée. Les oscillations périodiques de polarisation induites par le dépolariseur de Lyot peuvent être démodulées dans le domaine temporel, directement avec la transformée de Fourier du spectre optique ou sur un interférogramme. Sous réserve du caractère suffisant de l'étendue de la polarisation sur la plage de longueurs d'onde concernée, le dépolariseur de Lyot se substitue de manière efficace au contrôleur de polarisation en entrée et évite plusieurs états en entrée, réduisant par conséquent fortement le temps d'acquisition.

A.2 Procédure

A.2.1 Plage de longueurs d'onde et incrément de longueurs d'onde

La procédure exige de mesurer la puissance en fonction des longueurs d'onde (ou des fréquences optiques) sur l'étendue d'une plage à un incrément de longueur d'onde défini, une fois avec l'analyseur dans le trajet optique et une fois sans l'analyseur dans le trajet optique. La plage de longueurs d'onde peut influencer la précision du résultat (voir l'Article A.3). Il convient de choisir l'incrément de longueur d'onde de manière à satisfaire l'équation (A.1), avec remplacement de $\Delta\lambda$ par ledit incrément.

Si la méthode de transformée de Fourier est utilisée, il convient que l'incrément de longueur d'onde théorique soit uniforme dans le domaine fréquentiel optique et que le nombre d'échelons soit une puissance de 2. La taille d'échelon du monochromateur, exprimée dans le domaine fréquentiel optique $\delta\nu$, doit être inférieure d'un facteur 2 à la "fréquence d'oscillation" correspondant au DGD maximal mesuré. En raison de la puissance élevée à l'extérieur du moment d'ordre deux pour les fibres à couplage de mode fort, la condition de Nyquist exige un incrément en fréquence inférieur à trois fois la fréquence de la largeur efficace (moment d'ordre deux) associé au DGD maximal prévu. À savoir:

$$\frac{1}{6\delta\nu} > \Delta\tau_{\max} \quad (\text{A.2})$$

NOTE La largeur spectrale de la source est généralement égale ou inférieure au plus petit incrément de longueur d'onde. Par exemple, pour $\Delta\tau_{\max} = 0,67$ ps, une largeur spectrale du monochromateur de 2 nm à 1 550 nm ($\delta\nu = 249$ GHz) est une valeur type.

Si, à partir de la transformée de Fourier, il apparaît clairement qu'une quantité importante d'énergie est présente au voisinage de $\Delta\tau_{\max}$, il convient de répéter la mesure avec un incrément réduit.

A.2.2 Réalisation des balayages

Effectuer le balayage avec l'analyseur installé dans le trajet optique. Enregistrer la puissance reçue en la désignant par $P_A(\lambda)$.

Retirer l'analyseur du trajet optique et répéter le balayage. Enregistrer la puissance totale reçue en la désignant par $P_{\text{Tot}}(\lambda)$.

NOTE 1 En variante, la mesure peut être réalisée de manière ponctuelle par enregistrement des niveaux de puissance avec et sans l'analyseur pour chaque longueur d'onde, puis en passant à la longueur d'onde suivante.

NOTE 2 Les systèmes à balayage rapide comme un analyseur de spectre optique, réduisent l'effet du déplacement de la fibre, ce qui provoque une variation de l'état de polarisation lors de la mesure. Les systèmes à balayage rapide peuvent être utilisés avec succès sur des câbles aériens ou dans d'autres installations avec lesquelles l'observation du déplacement de la fibre est possible. [4], [5].

Calculer le rapport de puissance, $R(\lambda)$ comme suit:

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_{\text{Tot}}(\lambda)} \quad (\text{A.3})$$

La Figure A.2 représente un exemple de résultat de couplage de mode aléatoire type d'une application de liaison.

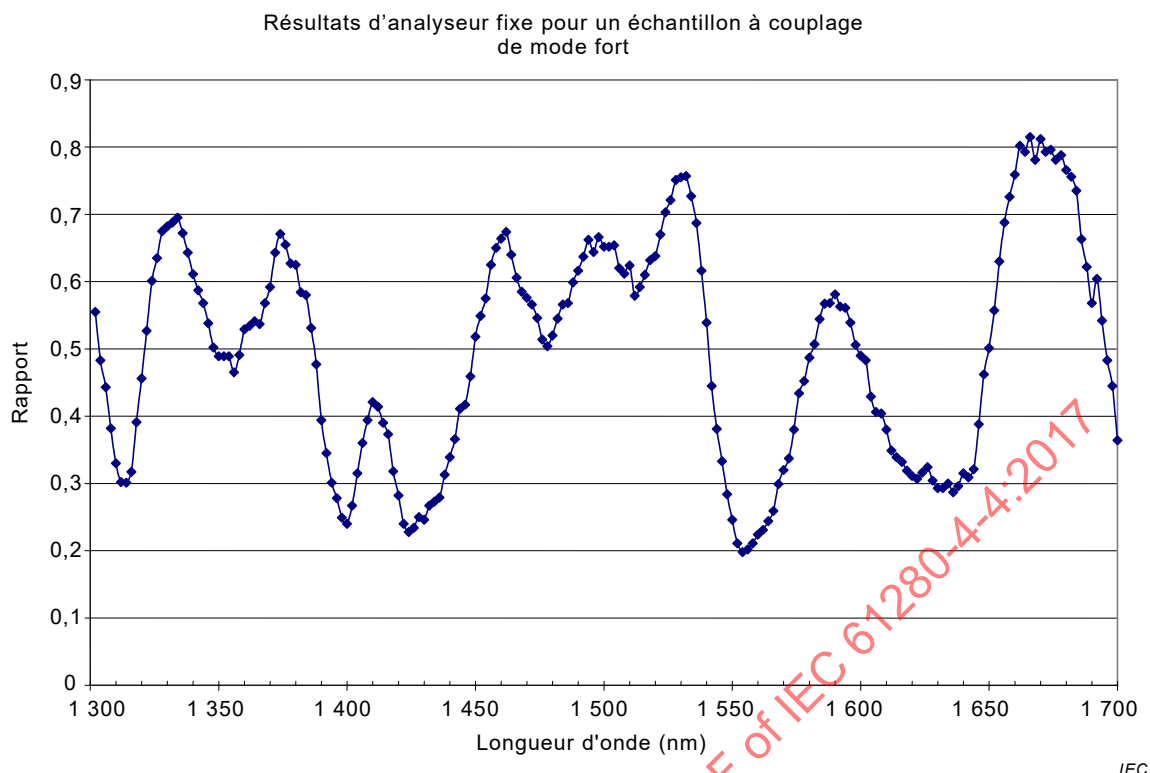


Figure A.2– Exemple de fonction R pour la méthode à analyseur fixe

Il existe une autre procédure qui consiste à laisser l'analyseur en place lors du second balayage, tout en le soumettant à une rotation de 90°. Enregistrer la puissance en la désignant par $P_B(\lambda)$. La formule relative au rapport de puissance s'exprime alors comme suit:

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_A(\lambda) + P_B(\lambda)} \quad (\text{A.4})$$

NOTE 1 La transformée de Fourier cosinusoidale de la différence, $P_B - P_A$, divisée par la somme est la fonction de corrélation croisée.

NOTE 2 Si un polarimètre est utilisé comme élément de détection, les paramètres de Stokes normalisés sont mesurés en fonction de la longueur d'onde. Les trois fonctions spectrales (une par élément de vecteur) sont indépendantes de la puissance reçue et correspondent aux trois fonctions de différence indépendantes entre les états de l'analyseur orthogonal qui peuvent être analysées de la même manière.

A.3 Calculs – Transformée de Fourier

A.3.1 Généralités

Une analyse de Fourier de $R(\lambda)$, généralement exprimée dans le domaine de fréquence optique ν est utilisée pour déduire la PMD. La transformée de Fourier convertit ces données de domaine de fréquence optique en domaine temporel. La transformée de Fourier fournit des informations directes concernant la distribution des temps d'arrivée de la lumière $\delta\tau$. Ces données sont soumises à un post-traitement comme cela est décrit ci-dessous pour en déduire la PMD attendue $\langle \Delta\tau \rangle$ pour la liaison en essai. Cette méthode s'applique normalement aux liaisons à couplage de mode aléatoire. Toutefois, cette méthode s'applique également au couplage de mode négligeable.

Deux techniques d'analyse supplémentaires sont présentées dans l'IEC TR 61282-9. Il s'agit de la transformée cosinusoidale et de la différenciation spectrale. Ces techniques produisent des résultats mathématiquement équivalant à GINTY (Annexe C). Elles ne sont pas incluses dans le présent document du fait de l'absence d'applications commerciales connues.

A.3.2 Prétraitement des données et transformée de Fourier

Pour utiliser cette méthode, la transformée de Fourier exige normalement des intervalles égaux de fréquence optique, de telle sorte que les données $R(\lambda)$ soient collectées à des valeurs λ et qu'elles forment des intervalles égaux dans le domaine de fréquence optique. En variante, des données prises à des intervalles λ égaux peuvent être ajustées (par exemple, en utilisant un ajustement par fonction spline du 3e degré) et l'interpolation utilisée pour produire ces points ou des techniques d'estimation spectrale plus avancées peuvent être utilisées. Dans chaque exemple, le rapport $R(\lambda)$ à chaque valeur λ utilisée est calculé en utilisant l'équation (A.3) ou l'équation (A.4), selon le cas.

Un remplissage par des zéros ou l'interpolation des données et la suppression du niveau continu peuvent être effectués sur les données de rapport $R(\lambda)$. Le fenêtrage des données peut également être utilisé comme une étape de préconditionnement avant la transformée de Fourier. La transformée de Fourier est à présent effectuée pour produire la distribution des données en amplitude $P(\delta\tau)$ pour chaque valeur de $\delta\tau$.

A.3.3 Adaptation des données de transformation

A.3.3.1 Généralités

Les données issues de la transformée de Fourier à zéro $\delta\tau$ sont le résultat de leur moyenne non nulle, parfois désignée courant continu ou DC (*direct current*). Les composantes "continues" des données $R(\lambda)$, sauf si elles sont supprimées avec soin, peuvent provenir, en partie, de la perte d'insertion de l'analyseur, par exemple. Lorsque le niveau "continu" n'est pas supprimé, jusqu'à deux points de données sont généralement shuntés (non utilisés) dans tout calcul ultérieur. Une variable, j , peut être définie de manière à ce que le "premier bin valide" au-dessus de zéro $\delta\tau$ qui est inclus dans les calculs corresponde à $j = 0$.

Pour supprimer le bruit de mesure des calculs suivants, $P(\delta\tau)$ est comparé à un niveau de seuil T_1 , réglé normalement à 200 % du niveau de bruit efficace du système de détection. Il est maintenant nécessaire de déterminer si la fibre a un couplage de mode négligeable ou aléatoire.

S'il s'avère que les premiers points X valables de $P(\delta\tau)$ sont tous inférieurs à T_1 , cela indique que $P(\delta\tau)$ doit avoir des caractéristiques de transitoires discrets qui sont types des fibres à couplage de mode négligeable. La valeur de X est égale à 3, sauf si l'analyse de Fourier utilise un remplissage par des zéros. Dans ce cas, la valeur de X peut être déterminée à partir de:

$$X = \frac{3 \times (\text{nombre_points_de_données_d'origine})}{\text{longueur_totale_de_matrice_après_remplissage_par_des_zéros}} \quad (\text{A.5})$$

La PMD est calculée en utilisant l'équation (A.6) pour une fibre à couplage de mode négligeable, ou en utilisant les équations (A.7) et (A.8) pour une fibre à couplage de mode aléatoire.

A.3.3.2 Calcul de la PMD pour des fibres à couplage de mode négligeable

Pour une fibre à couplage de mode négligeable (par exemple, une fibre à haute biréfringence) ou pour un composant biréfringent, tels que ceux utilisés pour l'étalonnage, $R(\lambda)$ ressemble à une onde sinusoïdale modulée (Figure A.3). La transformée de Fourier donne un résultat $P(\delta\tau)$ contenant un transitoire discret à un emplacement correspondant au temps d'arrivée d'impulsion relatif $\delta\tau$ dont le centre est la valeur $\text{PMD} <\Delta\tau>$.

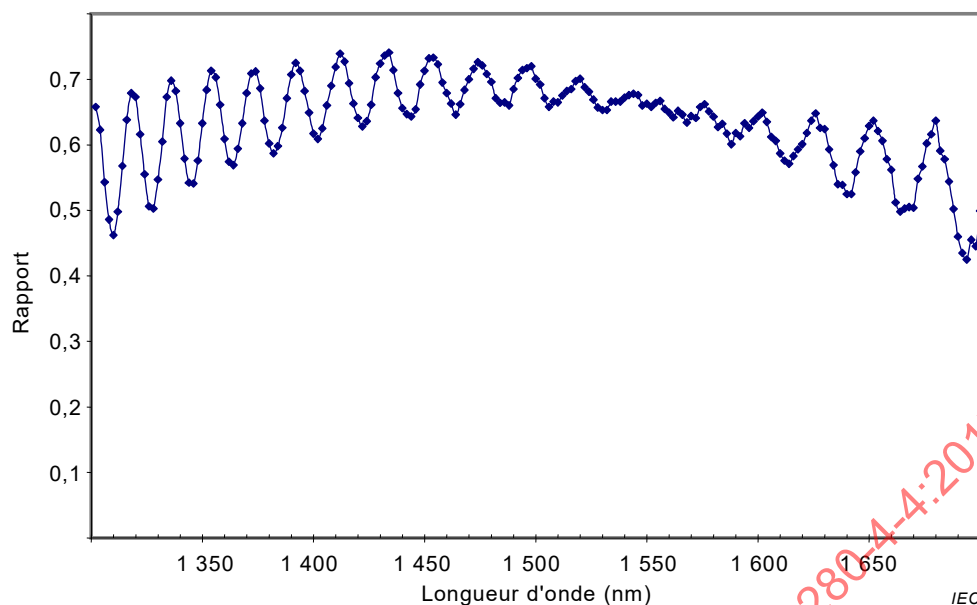


Figure A.3 – Onde sinusoïdale modulée

Pour définir le centre du transitoire $\langle \Delta\tau \rangle$, les points auxquels $P(\delta\tau)$ dépasse un second niveau de seuil prédéterminé T_2 , fixé généralement à 200 % du niveau de bruit efficace du système de détection, sont utilisés dans l'équation:

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{\sum_{e=0}^{M'} [P_e(\delta\tau) \delta\tau_e]}{\sum_{e=0}^{M'} P_e(\delta\tau)} \quad (\text{A.6})$$

Par conséquent, $M' + 1$ est le nombre de points de données de P dans le transitoire qui dépassent T_2 .

Dans l'équation (A.6), $\langle \Delta\tau \rangle$ est normalement indiqué en picosecondes. Si aucun transitoire n'est détecté (c'est-à-dire $M' = 0$), alors la PMD est égale à 0. D'autres paramètres, tels que la largeur efficace du transitoire et/ou la valeur de pic du transitoire, peuvent être consignés.

Si le dispositif en essai contient un ou plusieurs éléments biréfringents, il se produit plus d'un transitoire. Pour un nombre n de fibres/dispositifs mis bout à bout, $2^{(n-1)}$ transitoires au maximum sont obtenus.

A.3.3.3 Calcul de la PMD pour des fibres à couplage de mode aléatoire

Dans les exemples de couplage de mode aléatoire, $R(\lambda)$ devient une forme d'onde complexe similaire à celle représentée à la Figure A.2, les caractéristiques exactes étant fondées sur les statistiques réelles du processus de couplage à l'intérieur de la fibre/du câble. Les données soumises à la transformée de Fourier deviennent maintenant une loi $P(\delta\tau)$ représentant l'autocorrélation de la loi de probabilité des temps d'arrivée d'impulsion lumineuse $\delta\tau$ dans la fibre. La Figure A.4 représente la transformée de Fourier du résultat d'une mesure de couplage de mode aléatoire.

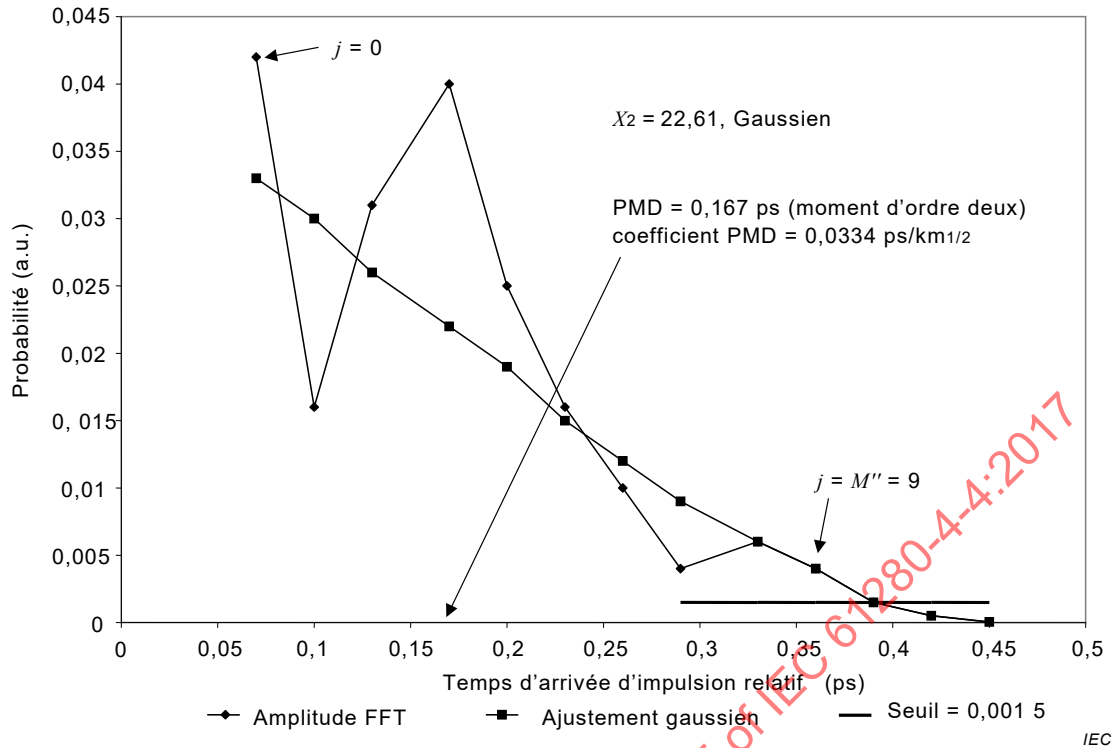


Figure A.4 – PMD par l'analyse de Fourier

Un comptage à partir de $j = 0$ permet de déterminer le premier point de P qui dépasse T_1 , et qui est suivi d'au moins X points de données en dessous de T_1 . Ce point représente le dernier point significatif (c'est-à-dire "l'extrémité") de la loi $P(\delta\tau)$, pour une fibre à couplage de mode aléatoire, qui n'est pas véritablement affectée par le bruit de mesure. La valeur $\delta\tau$ pour ce point est notée $\delta\tau_{\text{dernier}}$ et la valeur de j à $\delta\tau_{\text{dernier}}$ est notée M'' .

La racine carrée du moment d'ordre deux σ_R , de cette loi définit la fibre $PMD_{\text{EFF}} <\Delta\tau^2>^{1/2}$ et est donnée par:

$$<\Delta\tau^2>^{1/2} = \sigma_R = \left\{ \sum_{j=0}^{M''} [P_j(\delta\tau) \delta\tau_j^2] / \sum_{j=0}^{M''} [P_j(\delta\tau)] \right\}^{1/2} \quad (\text{A.7})$$

Lorsque le DGD est réputé suivre une distribution de Maxwell, la relation entre la PMD efficace et la PMD définie par la moyenne est donnée par:

$$<\Delta\tau> = \left(\frac{8}{3\pi} \right)^{1/2} <\Delta\tau^2>^{1/2} \quad (\text{A.8})$$

A.3.3.4 Calcul de la PMD pour des systèmes de fibres à couplage mixte

Il peut y avoir des exemples de mise bout à bout des fibres/composants à couplage négligeable et d'une ou plusieurs fibres à couplage aléatoire pour former une liaison. Dans ce cas, la détermination du centre (équation (A.6)) et la dérivation du moment d'ordre deux (équation (A.7)) peuvent être exigées. Noter que les transitoires dans $P(\delta\tau)$ ne peuvent être déterminées qu'au-delà du $\delta\tau_{\text{dernier}}$ calculé.

A.3.4 Domaine spectral

Pour les fibres à couplage aléatoire, un domaine spectral suffisant doit être utilisé pour former un ensemble spectral avec une précision suffisante. L'incertitude statistique peut être réduite le plus possible en utilisant le domaine spectral le plus large possible (au moins 200 nm, par exemple). La précision exigée et donc le domaine spectral doivent être spécifiés avant la mesure.

De plus, de très faibles valeurs $\delta\tau$ donnent de très longues périodes en $R(\lambda)$, et il convient que le domaine spectral de λ_1 à λ_2 couvre au moins deux "cycles" complets, si possible. Le domaine spectral couvert définit la valeur $\delta\tau$ la plus faible qui peut être résolue en $P(\delta\tau), \delta\tau_{\min}$:

$$\delta\tau_{\min} = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)c_0} \quad (\text{A.9})$$

où le facteur 2 est introduit pour permettre que deux points de données en P et adjacents à 0 soient généralement ignorés. Par exemple pour $\lambda_1 = 1\,270\text{ nm}$, $\lambda_2 = 1\,700\text{ nm}$, $\delta\tau_{\min} = 0,033\text{ ps}$.

Pour des fibres à PMD importante et à couplage négligeable, avec des données de rapport $R(\lambda)$ ressemblant à celles représentées à la Figure A.2, l'exigence relative au moyennage spectral décrit ci-dessus peut être assouplie et le domaine spectral peut être réduit (par exemple $(\lambda_2 - \lambda_1 \sim 30\text{ nm})$) afin de permettre la variation de la PMD en fonction de la longueur d'onde à examiner.

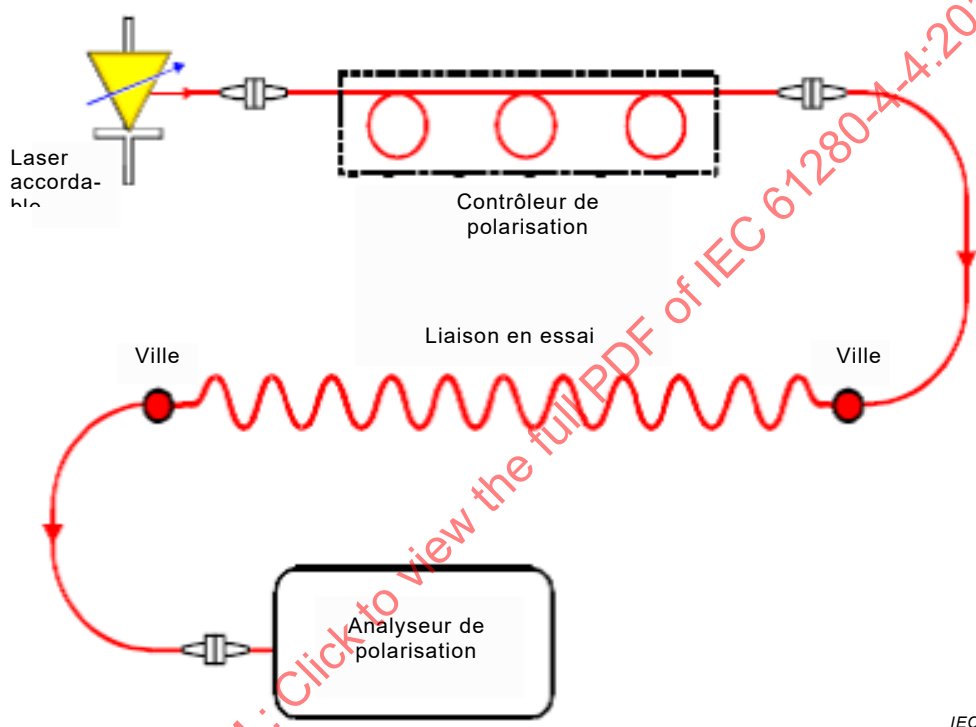
Annexe B (normative)

Méthode d'évaluation des paramètres de Stokes

B.1 Appareillage

B.1.1 Schémas fonctionnels

La Figure B.1 représente un schéma fonctionnel possible pour la méthode B, généralement utilisé avec la JME.



IEC

Figure B.1 – Schéma fonctionnel pour la méthode B utilisant une source à bande étroite (laser accordable)

La Figure B.2 représente un autre schéma fonctionnel possible pour la méthode B, généralement utilisé avec la PSA.

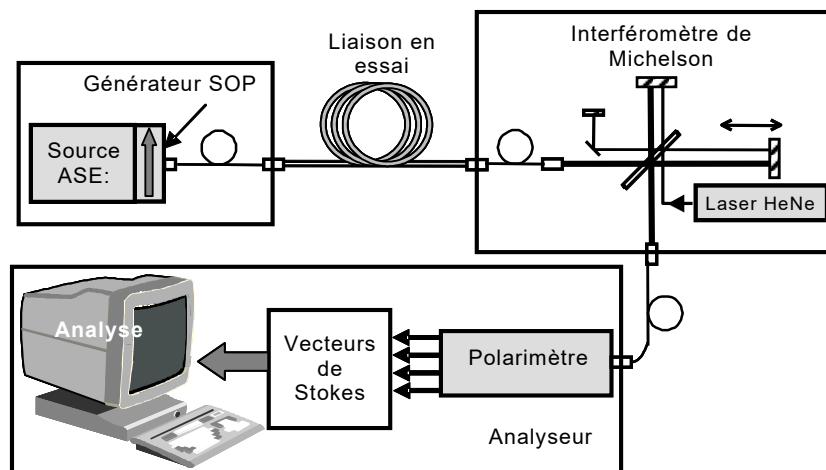


Figure B.2 – Schéma fonctionnel pour la méthode B utilisant une source à large bande (ASE)

B.1.2 Source lumineuse

Dans tous les cas, deux types de sources lumineuses peuvent être utilisés, selon le type de polarimètre. Une source à bande étroite, telle que le laser réglable représenté à la Figure B.1, peut être utilisée avec un analyseur de polarisation. Pour les liaisons amplifiées, le DOP de la source à bande étroite doit être maintenu supérieur à une certaine limite sur toute la plage de longueurs d'onde pour éviter l'effet adverse de l'ASE générée par les amplificateurs. En variante, une source à large bande de puissance élevée peut être utilisée avec un polarimètre à filtre passe-bande étroit tel qu'un analyseur de spectre optique ou un interféromètre utilisé comme un analyseur de spectre par transformée de Fourier placé avant le polarimètre, avant ou après la liaison en essai. Dans le cas d'une source à large bande, la largeur du filtre est prise comme largeur spectrale pour les besoins des calculs. Pour les liaisons amplifiées, la source à large bande présente toujours une quantité suffisante de longueurs d'onde disponibles pour éviter l'exigence relative au DOP similaire à la source à bande étroite, sauf si l'ASE de la liaison est élevée et présente un spectre plat sur toute la plage de longueurs d'onde concernée.

Dans les deux cas, la largeur spectrale doit être suffisamment faible pour maintenir le DOP exigé (voir 8.2), mais pas trop faible par rapport à la taille d'échelon sélectionnée pour éviter les phénomènes d'interférence cohérente inutiles et autres bruits parasites. Dans les deux cas, la plage de longueurs d'onde doit être suffisamment étendue pour permettre de mesurer la PMD avec une précision suffisante (voir B.3).

Le contrôleur de polarisation doit être capable de balayer au moins trois SOP connus distincts (généralement linéaires 0° , 45° et 90°) (voir équation (E.4) pour chaque longueur d'onde de mesure).

B.1.3 Polarimètre

Utiliser un polarimètre pour mesurer les vecteurs de Stokes de sortie pour chaque SOP et chaque longueur d'onde d'entrée sélectionnés.

B.2 Procédure

La sortie de la liaison est couplée à l'analyseur qui comprend le polarimètre. Les longueurs d'onde sont balayées sur une plage appropriée pour la zone de la longueur d'onde et la précision souhaitée (voir B.3) avec un incrément de longueur d'onde $\delta\lambda$. Pour des sources à bande étroite, l'incrément de longueur d'onde est donné en fonction de la valeur de DGD maximale prévue $\Delta\tau_{\max}$, de la longueur d'onde centrale de la zone mesurée λ_0 et de la vitesse de la lumière dans le vide c (299792458 m/s) comme suit:

$$\delta\lambda \leq \frac{\lambda_0^2}{2c\Delta\tau_{\max}} \quad (\text{B.1})$$

Par exemple, le produit du DGD maximal et de la taille d'échelon doit rester inférieure à 4 ps·nm pour une longueur d'onde de 1 550 nm et à 2,8 ps·nm pour une longueur d'onde de 1 300 nm. Cette exigence permet de vérifier que, d'une longueur d'onde d'essai à la suivante, le SOP de sortie effectue une rotation de moins de 180° autour de l'axe des états principaux de la sphère de Poincaré. Si un calcul approximatif de $\Delta\tau_{\max}$ ne peut être effectué, une série de mesures sur des échantillons est réalisée sur toute la plage de longueurs d'onde, en utilisant pour chaque mesure une paire de longueurs d'onde proches appropriées la largeur spectrale et le pas de réglage minimal de la source optique. Le DGD maximal ainsi mesuré est multiplié par un coefficient de sécurité de trois. $\Delta\tau_{\max}$ est remplacé par cette valeur dans l'expression ci-dessus, et la valeur de $\delta\lambda$ à utiliser dans la mesure réelle est calculée. Si le fait que l'incrément de longueur d'onde utilisé pour une mesure soit trop grand constitue un problème, la mesure peut être répétée en utilisant un plus petit incrément de longueur d'onde. Si la forme de la courbe de variation du DGD en fonction de la longueur d'onde et le DGD moyen demeurent non modifiés, l'incrément de longueur d'onde initial est satisfaisant.

Pour des sources à large bande, la largeur de bande de résolution (RBW) de l'analyseur doit satisfaire la condition suivante:

$$RBW_\lambda \leq \frac{\lambda_0^2}{5c\Delta\tau_{\max}} \quad (\text{B.2})$$

Les données de mesure sont regroupées pour chaque longueur d'onde. Pour chaque longueur d'onde, les SOP en entrée passent par les états utilisés (voir l'équation (E.4)) et les vecteurs de Stokes en sortie correspondants, $\hat{H}$, $\hat{V}$ et $\hat{Q}$, sont enregistrés. Les vecteurs de Stokes en sortie sont normalisés à une longueur unitaire. Pour calculer la JME (B.3.2), les vecteurs de Stokes normalisés doivent être convertis en vecteurs de Jones normalisés en utilisant l'équation (E.4) (avec pour hypothèse $0 < \theta < \pi$) avant de procéder au calcul. Pour la méthode PSA (B.3.3), les vecteurs de Stokes en sortie normalisés sont utilisés sans conversion.

NOTE Les systèmes à balayage rapide comme un laser accordable à longueur d'onde balayée, réduisent l'effet du déplacement de la fibre, ce qui provoque une variation de l'état de polarisation lors de la mesure. Les systèmes à balayage rapide peuvent être utilisés avec succès sur des câbles aériens ou dans d'autres installations avec lesquelles l'observation du déplacement de la fibre est possible. [4], [5].

B.3 Calculs

B.3.1 Généralités

Les méthodes de calcul exigent l'évaluation des différences entre les vecteurs à une fréquence optique angulaire ω et la suivante à $\omega + \Delta\omega$ (la fréquence optique angulaire est donnée par $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$). Les deux méthodes de calcul génèrent une série de valeurs de DGD en fonction de la longueur d'onde. La Figure E.4 fournit un exemple d'une telle fonction. En variante, les valeurs de DGD peuvent être affichées sous la forme d'un histogramme tel que celui représenté à la Figure E.5.

La moyenne de ces valeurs de DGD est la valeur de la PMD.

NOTE Les calculs de la JME et de la PSA sont mathématiquement équivalents pour des hypothèses de PMD du premier ordre et lorsque la PDL est négligeable.

B.3.2 Analyse des vecteurs propres de la matrice de Jones (JME)

B.3.2.1 Généralités

En ce qui concerne la JME, la matrice de Jones de réponse est calculée pour chaque longueur d'onde à partir des paramètres de Stokes. Pour chaque incrément de longueur d'onde, le produit de la matrice de Jones $T(\omega + \Delta\omega)$ à la fréquence optique supérieure, ainsi que le produit de l'inverse de la matrice de Jones $T^{-1}(\omega)$ à la fréquence optique inférieure sont calculés. Le DGD $\Delta\tau$ pour l'incrément de longueur d'onde particulier est déterminé à partir de l'expression suivante:

$$\Delta\tau = \left| \frac{\text{Arg}\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)}{\Delta\omega} \right| \quad (\text{B.3})$$

où

ρ_1 et ρ_2 sont les valeurs propres complexes de $T(\omega + \Delta\omega)T^{-1}(\omega)$;

Arg désigne la fonction argument, c'est-à-dire, $\text{Arg}(\eta e^{i\theta}) = \theta$, où η est l'amplitude (réelle) du nombre complexe;

NOTE $T(\omega + \Delta\omega)$ et $T(\omega)$ sont obtenus à partir des mesures et des calculs de B.3.2.2.

Pour les besoins de l'analyse des données, chaque valeur de DGD est le DGD pour la longueur d'onde inférieure. La série de valeurs de DGD obtenues à partir d'une série d'incréments de longueurs d'onde sur une plage de longueurs d'onde comprend une mesure unique de la PMD de la liaison.

B.3.2.2 Analyse des vecteurs propres de la matrice de Jones (JME) et calcul du DGD

R.C. Jones a fourni un algorithme explicite pour déterminer de manière expérimentale la matrice de Jones de transmission directe T d'une liaison optique linéaire inconnue, ne variant pas dans le temps [2]. La restriction de linéarité exclut les liaisons optiques qui génèrent de nouvelles fréquences optiques. La restriction d'invariance dans le temps s'applique uniquement à la transformation de polarisation provoquée par la liaison et n'inclut pas le retard de phase optique absolu. Par conséquent, la présente technique peut être utilisée pour caractériser les réseaux de fibres, lorsque le retard de phase à travers la fibre dérive pendant la mesure, à condition que l'appareillage de mesure du DGD ne soit pas affecté par les variations de retard de phase.

Le mesurage de la matrice de Jones exige l'application de trois SOP connus distincts tels qu'une lumière polarisée linéairement à la liaison. Dans le processus décrit ci-dessous, les SOP linéaires orientés à 0° , 45° et 90° sont utilisés, comme cela est décrit par Jones et représenté à la Figure E.3. Les calculs peuvent être généralisés pour s'adapter à d'autres SOP en entrée.

Tout vecteur de Jones V peut être spécifié entièrement par une amplitude, une phase absolue et un vecteur unitaire $\hat{V}$ qui localise le SOP sur la sphère de Poincaré. Pour mesurer la matrice de Jones d'une liaison, un stimulus de champ optique de SOP linéaire parallèle à l'axe des x (0°) est d'abord généré et le vecteur unitaire de Jones de réponse $\hat{H}$ qui en résulte est mesuré/calculé à la sortie de la liaison. Similairement, les champs de stimulus de SOP linéaire parallèle à l'axe y (90°), et parallèle à la bissectrice de l'angle entre les axes positifs x et y (45°) aboutissent à des vecteurs de Jones unitaires de réponse $\hat{V}$ et $\hat{Q}$, respectivement.

Trois rapports complexes indépendants des intensités des trois stimuli de champs peuvent maintenant être formés à partir des composantes en x et y de $\hat{H}$, $\hat{V}$ et $\hat{Q}$:

$$k_1 = \hat{h}_x / \hat{h}_y \quad k_2 = \hat{v}_x / \hat{v}_y \quad k_3 = \hat{q}_x / \hat{q}_y \quad (\text{B.4})$$

Un quatrième rapport $k_4 = (k_3 - k_2) / (k_1 - k_3)$ est ensuite déterminé. Jusqu'à une constante complexe β , la matrice de transmission de Jones T est donnée par:

$$T = \begin{bmatrix} k_1 k_4 & k_2 \\ k_4 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

B.3.2.3 Détermination du retard de groupe différentiel (DGD)

La matrice de transfert de fréquence de la matrice de Jones, J , est calculée comme suit:

$$J(\omega) = T(\omega + \Delta\omega)T^{-1}(\omega) \quad (\text{B.6})$$

Le DGD $\Delta\tau$ est calculé comme suit:

$$\Delta\tau = |\text{Arg}(\rho_1 / \rho_2) / \Delta\omega| \quad (\text{B.7})$$

où

ρ_1 et ρ_2 sont les valeurs propres de $J(\omega)$;

Arg désigne la fonction argument, c'est-à-dire, $\text{Arg}(\alpha e^{i\theta}) = \theta$.

Dans la pratique, l'impact de la PDL sur la mesure de $\Delta\tau$ peut être réduit en utilisant des intervalles plus faibles de fréquence optique en radians $\Delta\omega$. Dans tous les cas, la condition $\Delta\tau\Delta\omega < \pi$ doit être satisfaite pour éviter les ambiguïtés de la fonction argument à valeurs multiples.

B.3.3 Analyse de la sphère de Poincaré (PSA) et calcul du DGD

L'analyse présentée en [7] est une variante à la fonction argument de la JME. Elle est fondée sur une fonction en arc sinus.

À partir des vecteurs de Stokes normalisés mesurés $\hat{H}$, $\hat{V}$, $\hat{Q}$, calculer:

$$\hat{h} = \hat{H}, \quad \hat{q} = \frac{\hat{H} \times \hat{Q}}{|\hat{H} \times \hat{Q}|} \times \hat{H}, \quad \hat{v} = \frac{\hat{q} \times \hat{V}}{|\hat{q} \times \hat{V}|} \times \hat{q} \quad (\text{B.8})$$

L'analyse est ainsi indépendante des SOP en entrée et il n'est donc pas nécessaire de les connaître.

À partir des vecteurs de Stokes $\hat{h}$, $\hat{v}$ et $\hat{q}$, former les produits croisés vectoriels $\hat{c} = \hat{h} \times \hat{q}$ et $\hat{c}' = \hat{q} \times \hat{v}$ à chaque longueur d'onde. Pour chaque incrément de longueur d'onde, calculer les différences finies

$$\Delta\hat{h} = \hat{h}(\omega + \Delta\omega) - \hat{h}(\omega) \quad \Delta\hat{q} = \hat{q}(\omega + \Delta\omega) - \hat{q}(\omega) \quad \Delta\hat{v} = \hat{v}(\omega + \Delta\omega) - \hat{v}(\omega)$$

$$\Delta\hat{c} = \hat{c}(\omega + \Delta\omega) - \hat{c}(\omega) \quad \Delta\hat{c}' = \hat{c}'(\omega + \Delta\omega) - \hat{c}'(\omega) \quad (\text{B.9})$$

Déterminer le DGD, $\Delta\tau$, pour un incrément de longueur d'onde particulier, à partir de l'expression suivante:

$$\Delta\tau = \frac{1}{\Delta\omega} \cdot \left[\arcsin\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2} (\Delta\hat{h}^2 + \Delta\hat{q}^2 + \Delta\hat{c}^2)}\right) + \arcsin\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2} (\Delta\hat{q}^2 + \Delta\hat{v}^2 + \Delta\hat{c}'^2)}\right) \right] \quad (\text{B.10})$$

NOTE $\Delta\hat{h}^2 = \Delta\hat{h} \cdot \Delta\hat{h}$

Chaque valeur de DGD est prise pour représenter le DGD au milieu de l'incrément de longueur d'onde correspondant.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61280-4-4:2017

Annexe C (normative)

Méthode interférométrique

C.1 Généralités

L'Annexe C contient des exigences détaillées pour effectuer des mesures de PMD par la méthode interférométrique (INTY) – méthode C. Cette méthode indique normalement la valeur métrique PMD_{EFF} (valeur efficace de DGD) (voir l'équation (2)), qui peut être convertie en valeur métrique $PMD_{moyenne}$ (moyenne linéaire de DGD) en utilisant l'équation (3), avec l'hypothèse d'une correspondance exacte entre les valeurs et une distribution de Maxwell.

Il existe deux versions de la méthode C avec des dispositifs de mesure et des analyses de données différentes:

- L'analyse traditionnelle (TINTY) qui utilise un dispositif de base [8-10];
- une analyse générale (GINTY) qui utilise un dispositif modifié par rapport à celui de la TINTY [11].

Un dispositif générique est représenté à la Figure C.1 qui constitue la base de la mise en œuvre expérimentale de la méthode C (INTY). Ce dispositif peut présenter une variance qui peut être utilisée tel que représenté ci-dessous.

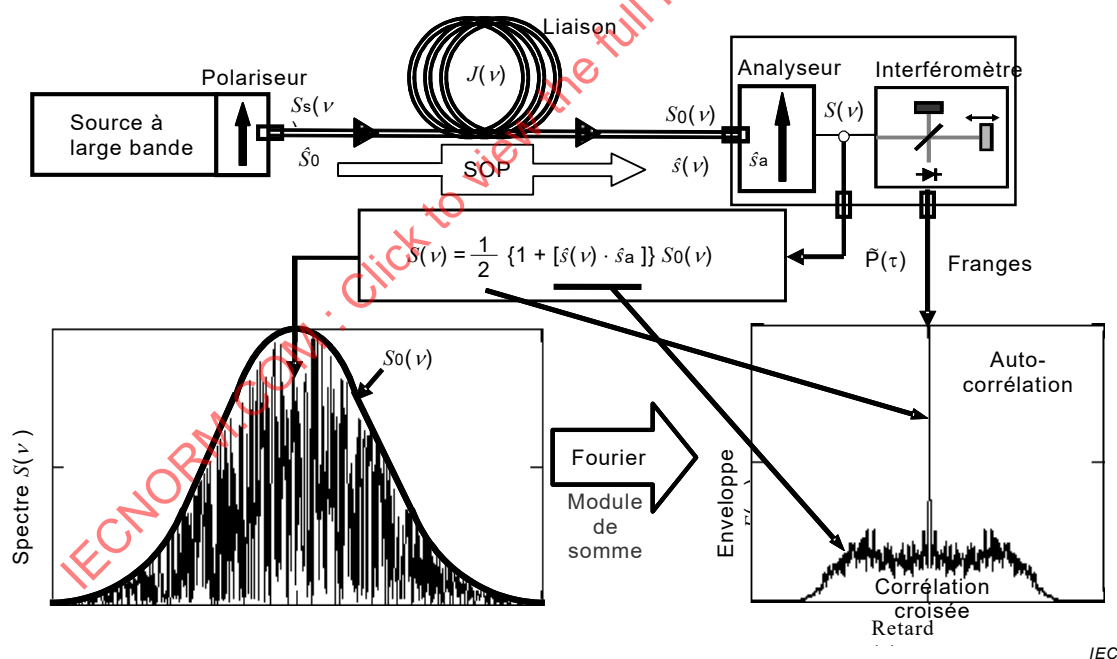


Figure C.1 – Dispositif générique pour la méthode C (INTY)

Les paramètres utilisés à la Figure C.1 et dans l'ensemble de l'Annexe C sont les suivants:

- | | |
|------------|---|
| ν | fréquence optique ($\nu\lambda = c$); |
| τ | différence de temps de transmission aller et retour entre les deux bras de l'interféromètre; |
| $S_s(\nu)$ | spectre optique, au niveau de l'entrée du DUT $\equiv$ densité spectrale de $\vec{E}_s(\nu)$, le spectre de la source; |

$S_0(\nu)$	spectre optique, au niveau de la sortie du DUT (entrée de l'analyseur);
$S(\nu)$	spectre optique, au niveau de la sortie de l'analyseur (entrée de l'interféromètre);
$\hat{s}_0$	SOP en entrée (au niveau de l'entrée du DUT; un vecteur unitaire de Stokes);
$\hat{s}(\nu)$	SOP en sortie (au niveau de la sortie du DUT);
$\hat{s}_a(\nu)$	axe de transmission de l'analyseur;
$x(\nu) \equiv \hat{s}_a \times \hat{s}(\nu)$	paramètres de Stokes donnant la projection de $\hat{s}(\nu)$ sur l'axe de transmission de l'analyseur. Il s'agit du paramètre $x(\nu)$, qui contient les informations sur la PMD;
$P(\tau)$	puissance optique au niveau de la sortie de l'interféromètre, en fonction du retard τ ;
$\tilde{P}(\tau)$	partie de P dépendant de τ (partie "courant alternatif");
P_0	partie constante de $P(\tau)$ (partie "courant continu");
$E(\tau)$	enveloppe des franges;
$Ex(\tau)$	enveloppe de la corrélation croisée;
$E_0(\tau)$	enveloppe de l'autocorrélation.

La puissance optique au niveau de la sortie de l'interféromètre, $P(\tau)$ est égale à la somme des parties "courant alternatif" et "courant continu". Les deux parties sont égales pour $\tau = 0$ et donc la partie "courant alternatif" peut être calculée. Dans le cas d'un interféromètre théorique, la partie "courant alternatif" est une fonction paire dont la moitié droite est égale à la transformée de Fourier cosinusoidale du spectre optique $S(\nu)$, émise par l'analyseur. Dans le cas d'un interféromètre non théorique, certaines corrections peuvent être apportées selon les informations détaillées de la mise en œuvre.

Pour la méthode TINTY, l'enveloppe de l'interférogramme, $E(\tau)$, est la valeur absolue de la partie "courant alternatif". Pour la méthode GINTY, les calculs supplémentaires nécessaires à l'obtention des enveloppes de corrélation croisée et d'autocorrélation sont décrits en C.3.2.4. Ces calculs impliquent deux interférogrammes mesurés qui proviennent de l'analyseur réglé sur deux SOP orthogonaux.

C.2 Analyse traditionnelle (TINTY)

C.2.1 Appareillage

C.2.1.1 Schéma fonctionnel

La Figure C.2 représente un schéma fonctionnel pour les mesures de liaisons par la méthode C (TINTY).

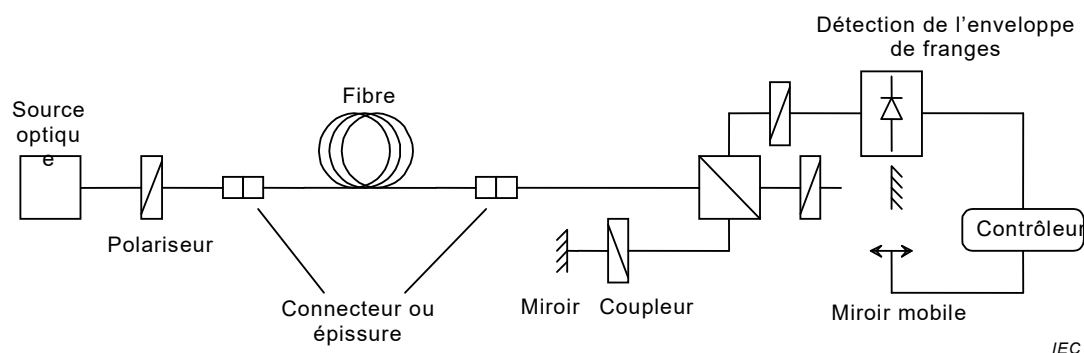


Figure C.2 – Schéma fonctionnel pour la méthode C (TINTY)

C.2.1.2 Source lumineuse

Une source lumineuse polarisée à large bande qui émet un rayonnement aux longueurs d'onde de mesure prévues est utilisée, telle qu'une LED ou une source superfluorescente. La longueur d'onde centrale λ_0 doit se situer dans la fenêtre 1 310 nm ou 1 550 nm ou toute autre fenêtre concernée. La forme spectrale doit être approximativement gaussienne, sans ondulations susceptibles d'influencer la fonction d'autocorrélation de la lumière émergente. La largeur de raie de la source (appelée également largeur spectrale dans le champ de la LED) $\Delta\lambda$ doit être connue pour calculer le temps de cohérence, t_c , qui est déterminé à partir de l'équation suivante:

$$t_c = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda c} \quad (\text{C.1})$$

où

λ_0 est la longueur d'onde centrale de la source;

$\Delta\lambda$ est la largeur de raie de la source;

c est la vitesse de la lumière dans le vide.

C.2.1.3 Séparateur de faisceau

Le séparateur de faisceau est utilisé pour séparer la lumière polarisée incidente en deux composantes qui se propagent dans les bras de l'interféromètre. Le séparateur peut être un coupleur à fibres optiques ou un séparateur de faisceau à coin cubique.

C.2.1.4 Interféromètre

Un interféromètre de type Michelson, soit en espace libre, soit fibré, est placé à l'extrémité du détecteur de la liaison en essai.

C.2.2 Procédure

C.2.2.1 Étalonnage

L'équipement est étalonné en mesurant une fibre hautement biréfringente de PMD connue. En variante, un ensemble de fibres hautement biréfringentes de PMD connue peut également être mesuré.

C.2.2.2 Procédure d'essai

Une extrémité de la liaison est couplée à la sortie polarisée de la source lumineuse. L'autre extrémité est couplée à l'entrée de l'interféromètre.

La puissance de sortie optique de la source lumineuse est réglée à une valeur de référence caractéristique pour le système de détection utilisé. Pour obtenir un contraste de frange suffisant, la puissance optique doit être pratiquement la même dans les deux bras de l'interféromètre.

Une première acquisition est réalisée en déplaçant le miroir du bras de l'interféromètre et en enregistrant l'intensité de la lumière. À partir du motif de franges obtenu pour un SOP choisi, le retard de PMD peut être calculé comme cela est décrit en C.2.3. Un exemple type de motif de franges pour un couplage de mode de polarisation aléatoire est représenté à la Figure C.3. Le motif de franges doit être un spectre gaussien lisse représentant un couplage de mode aléatoire théorique

En cas de couplage de mode insuffisant ou en cas de PMD faible, il est recommandé de répéter la mesure pour différents SOP ou de moduler l'état de polarisation au cours de la mesure afin d'obtenir un résultat qui constitue une moyenne sur tous les SOP.

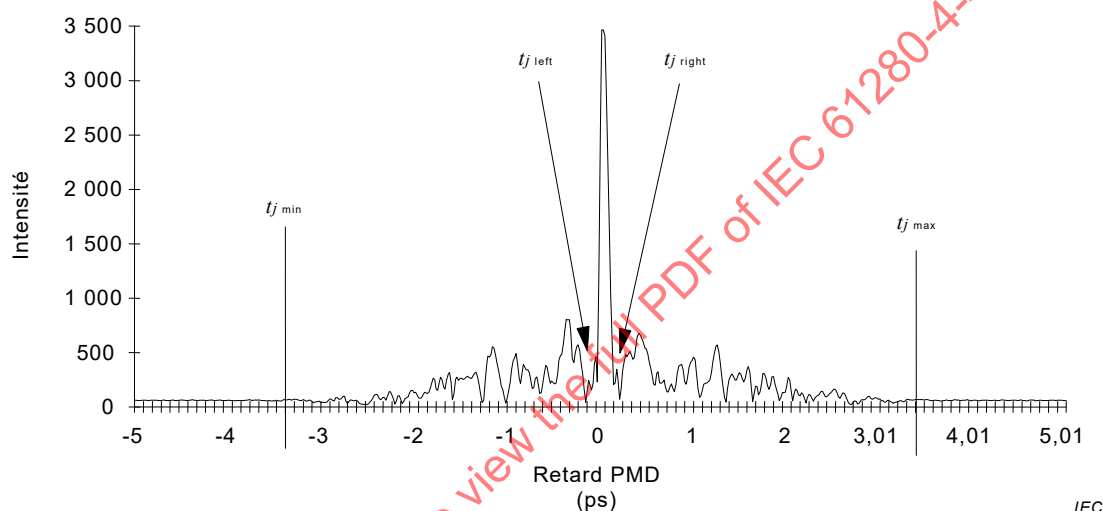


Figure C.3 – Données types obtenues par la méthode C (TINTY)

C.2.3 Calculs

Les calculs suivants conviennent au régime de couplage de mode aléatoire/fort associé aux liaisons. La forme de l'interférogramme (en ne tenant pas compte du pic central) est caractérisée.

La valeur PMD_{EFF} est déterminée à partir du moment d'ordre deux (largeur efficace) de la fonction de corrélation croisée du signal détecté (interférogramme).

$$PMD_{EFF} = \left(\sqrt{\frac{3}{4}} \right) \sigma_{\varepsilon} \quad (C.2)$$

où σ_{ε} est la largeur efficace de l'enveloppe de corrélation croisée. Un algorithme détaillé du calcul provenant de l'enveloppe des franges mesurée est décrit dans l'Annexe H.2.

Pour certaines hypothèses données ci-dessous, l'équation (C.2) peut être liée à l'équation (2) de la manière suivante:

$$\langle \Delta \tau^2 \rangle = \frac{3}{4} \langle \sigma_{\varepsilon}^2 \rangle \quad (C.3)$$

L'équation (C.3) est obtenue à partir de la théorie [8-10] donnée par les hypothèses suivantes (notamment):

- un couplage de mode aléatoire théorique:

NOTE 1 Couplage aléatoire théorique signifie $L/h \rightarrow \infty$ et un axe de biréfringence uniformément réparti. L est la longueur du dispositif et h est la longueur de couplage de polarisation. Pour un dispositif constitué de N segments biréfringents mis bout à bout de longueur h , cela correspond à $N \rightarrow \infty$ avec des axes uniformément répartis.

NOTE 2 Il est possible de procéder à l'analyse lorsque le couplage de mode est négligeable ou en l'absence de couplage.

- une source purement gaussienne sans ondulations;
- $\text{PMD} \gg \sigma_0$

où σ_0 est la largeur efficace de l'enveloppe d'autocorrélation;

- des conditions ergodiques.

NOTE 3 Étant donné que la source est gaussienne, le résultat constitue une forme de moyenne pondérée des valeurs de DGD. Cette pondération n'est pas spécifiée dans la méthode TINTY, mais elle l'est dans la méthode GINTY. Pour cette raison, il est prévu que la méthode C (TINTY) donne un résultat différent pour une durée et une plage de longueurs d'onde données par rapport à une des méthodes qui utilise une pondération rectangulaire. L'hypothèse des conditions ergodiques entraîne la validité de la relation des valeurs attendues. Dans la pratique, les plages de longueurs d'onde échantillonnées par différentes mises en œuvre des autres méthodes varient également, ce qui implique l'obtention de résultats obtenus par ces méthodes également différents.

C.3 Analyse générale (GINTY)

C.3.1 Avantage

La méthode GINTY permet d'éliminer certaines hypothèses exigées pour l'équation (C.3) de la méthode TINTY. Il s'agit notamment des hypothèses suivantes:

- l'hypothèse d'un couplage de mode aléatoire théorique n'est pas exigée;
- l'hypothèse d'une source gaussienne n'est pas exigée;
- l'hypothèse selon laquelle la PMD est grande par rapport à la largeur de la fonction d'autocorrélation n'est pas exigée.

C.3.2 Appareillage

C.3.2.1 Schéma fonctionnel

Outre le dispositif représenté à la Figure C.2, la Figure C.4 représente un schéma fonctionnel pour les mesures de liaisons par la méthode C (GINTY).

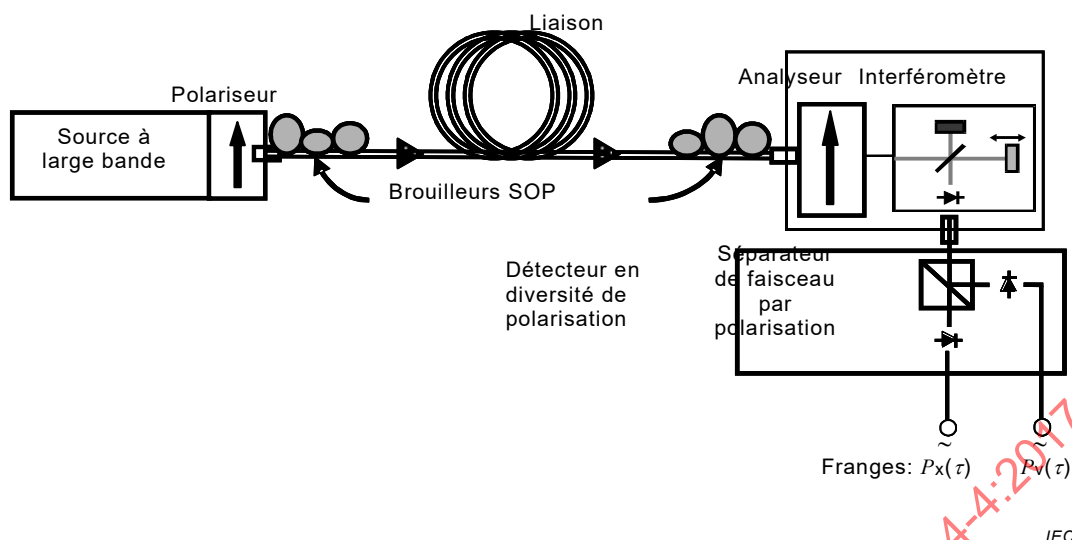


Figure C.4 – Schéma fonctionnel pour la méthode C (GINTY)

Lorsque la méthode C (GINTY) utilise le dispositif représenté à la Figure C.4, deux interférogrammes P_x et P_y sont obtenus. Ces deux interférogrammes correspondent à deux configurations de l'analyseur orthogonal utilisant le dispositif de la Figure C.1. Les brouilleurs de polarisation permettent de rendre aléatoires à la fois le SOP en entrée et la base des deux états effectifs de l'analyseur de sortie. Les "franges" représentées à la Figure C.4 correspondent aux parties "courant alternatif" des interférogrammes théoriques, qui peuvent également être obtenues à partir du dispositif de la Figure C.1 pour une paire donnée de configurations du polariseur d'entrée et de l'analyseur de base. La somme et la différence de ces deux matrices de franges sont élevées au carré pour obtenir le carré de l'enveloppe des fonctions d'autocorrélation et de corrélation croisée.

C.3.2.2 Source lumineuse

Une source lumineuse à large bande qui émet un rayonnement aux longueurs d'onde de mesure prévues est utilisée, telle qu'une LED ou une source superfluorescente. La longueur d'onde centrale doit se situer dans la fenêtre 1 310 nm ou 1 550 nm ou toute autre fenêtre concernée. Aucune autre exigence particulière ne s'applique pour le spectre de la source.

C.3.2.3 Polariseurs/brouilleurs

Un brouillage de polarisation peut être utilisé tel que détaillé en 7.6.

C.3.2.4 Séparateur de faisceau par polarisation

Un séparateur de faisceau par polarisation (PBS – *polarization beam splitter*) peut être utilisé pour obtenir des interférogrammes à partir des SOP en sortie orthogonaux (opposés sur la sphère de Poincaré) pour la même combinaison de SOP en entrée et en sortie. Ces deux interférogrammes permettent de calculer l'autocorrélation et la corrélation croisée comme des fonctions distinctes. Associé au système de détection, le PBS forme un système de détection en diversité de polarisation. Des moyens autres que le PBS peuvent être utilisés pour obtenir ces interférogrammes à partir des SOP en sortie orthogonaux.

Les deux motifs de franges observés avec deux axes d'analyseur orthogonaux (opposés sur la sphère de Poincaré) peuvent être utilisés pour calculer les enveloppes d'autocorrélation et de corrélation croisée comme suit:

- enveloppe d'autocorrélation pour un seul SOP en entrée et en sortie:

$$E_0(\tau) = \left| \tilde{P}_x(\tau) + \tilde{P}_y(\tau) \right| \quad (\text{C.4})$$

- enveloppe de corrélation croisée pour un seul SOP en entrée et en sortie:

$$E_x(\tau) = \left| \tilde{P}_x(\tau) - \tilde{P}_y(\tau) \right| \quad (\text{C.5})$$

C.3.2.5 Interféromètre

Un interféromètre de type Michelson, soit en espace libre, soit fibré, est placé à l'extrémité du détecteur de la liaison en essai.

C.3.3 Procédure

C.3.3.1 Étalonnage

L'équipement est étalonné selon C.2.2.1.

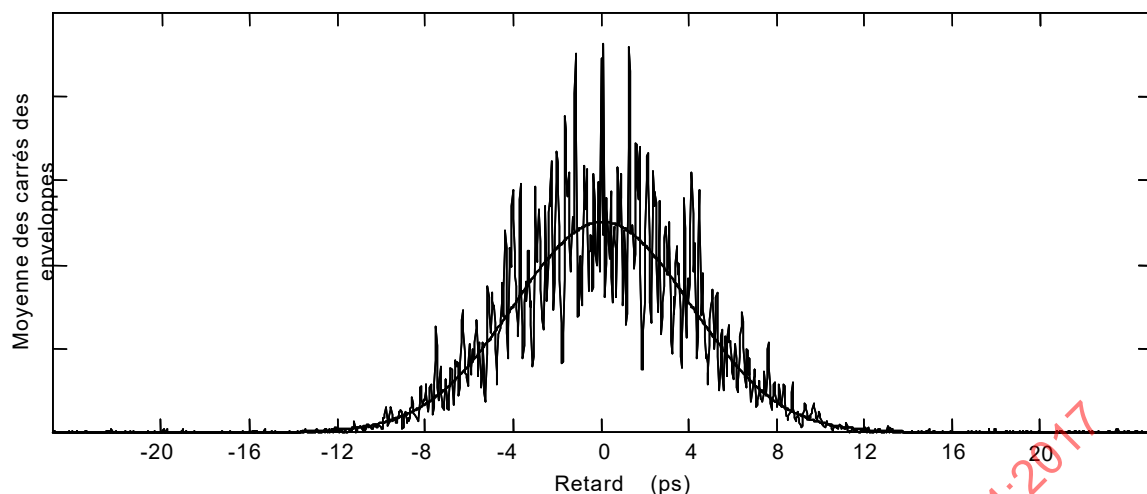
C.3.3.2 Procédure d'essai

Dans le cas du dispositif utilisé comme à la Figure C.2, une extrémité de la liaison est couplée à la sortie polarisée de la source lumineuse polarisée. L'autre extrémité est couplée à l'entrée de l'interféromètre. Lorsque le dispositif représenté à la Figure C.4 est utilisé, une extrémité de la liaison est couplée à la sortie de la combinaison du brouilleur et du polariseur. L'autre extrémité est couplée à l'entrée de la combinaison du brouilleur et de l'interféromètre.

La puissance de sortie optique de la source lumineuse est réglée à une valeur de référence caractéristique pour le système de détection utilisé. Pour obtenir un contraste de frange suffisant, la puissance optique doit être pratiquement la même dans les deux bras de l'interféromètre.

Une première acquisition est réalisée en déplaçant le miroir du bras de l'interféromètre et en enregistrant l'intensité de la lumière. À partir du motif de franges obtenu pour une combinaison de SOP en entrée et en sortie ou à partir d'un brouillage de SOP en entrée et en sortie, le retard de PMD peut être calculé comme cela est décrit en C.3.4. Des exemples types de moyenne des carrés des enveloppes de corrélation croisée pour des couplages de mode de polarisation aléatoires et mixtes représentant des applications de liaison sont représentés aux Figures C.5 et C.6 respectivement.

- Figure C.5. Couplage de mode aléatoire, $L/h = 100$, $PMD = 4,94$ ps, $\sigma_A = 50$ fs, $PMD/\sigma_A \sim 100$

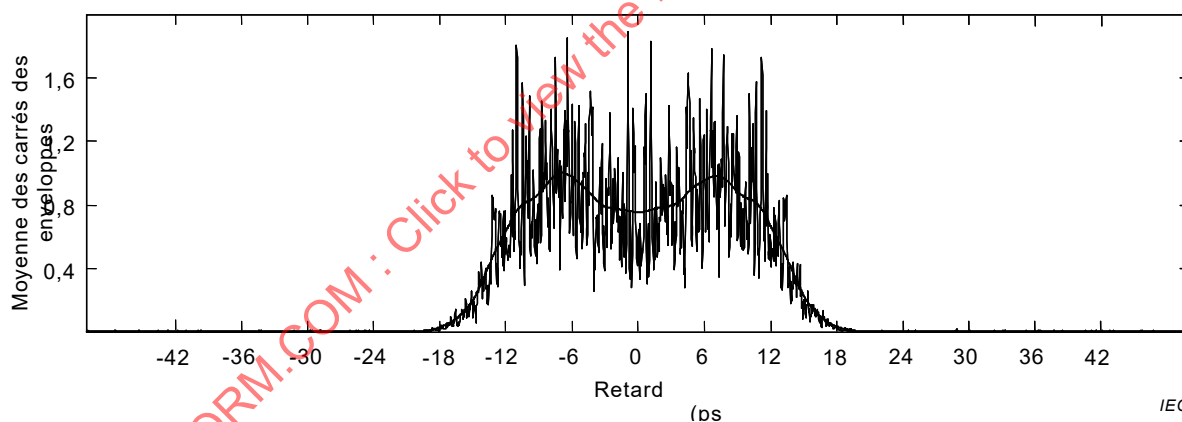


IEC

NOTE La courbe lissée est utilisée uniquement pour faciliter la lecture. L'analyse ne porte pas sur la courbe lissée ni sur aucun type d'ajustement.

Figure C.5 – Données types de couplage de mode aléatoire obtenues par la méthode C (GINTY)

- Figure C.6. Couplage de mode mixte, enveloppe quasiment plane; la définition de L/h perd son importance; le DUT est constitué d'une section de couplage de mode aléatoire avec $L/h = 10 + 1$ et d'une section de couplage de mode négligeable avec $DGD = PMD_{\text{Random}}/4$, $PMD = 9,97$ ps, $\sigma_A = 50$ fs



IEC

NOTE La courbe lissée est utilisée uniquement pour faciliter la lecture. L'analyse ne porte pas sur la courbe lissée ni sur aucun type d'ajustement.

Figure C.6 – Données types de couplage de mode mixte obtenues par la méthode C (GINTY)

C.3.4 Calculs

Les calculs suivants conviennent à tout régime de couplage de mode associé aux liaisons.

La détermination de la PMD est fondée sur les carrés des enveloppes des interférogrammes de corrélation croisée et d'autocorrélation.

Premièrement, former les enveloppes $E_{0i}(\tau)$ et $E_{xi}(\tau)$ des équations C.4 et C.5 à partir de N paires d'interférogrammes bruts, avec une paire pour chaque combinaison de SOP en entrée et en sortie (représentation par l'indice i). Deuxièmement, former les carrés des enveloppes $E_{0i}^2(\tau)$ et $E_{xi}^2(\tau)$. Troisièmement, calculer la moyenne des carrés des enveloppes comme suit:

$$\overline{E}_0^2(\tau) = \frac{1}{N} \sum_i E_{0i}^2(\tau) \quad \overline{E}_x^2(\tau) = \frac{1}{N} \sum_i E_{xi}^2(\tau) \quad (\text{C.6})$$

Quatrièmement, calculer la largeur efficace des deux moyennes des carrés des enveloppes échantillonnées σ_0 et σ_x , respectivement. Un algorithme d'échantillonnage pour ce calcul est donné à l'Article H.3. Les définitions théoriques de ces largeurs sont:

$$\sigma_0^2 = \frac{\int_{\tau} \tau^2 \langle E_0^2(\tau) \rangle d\tau}{\int_{\tau} \langle E_0^2(\tau) \rangle d\tau} \quad (\text{C.7})$$

$$\sigma_x^2 = \frac{\int_{\tau} \tau^2 \langle E_x^2(\tau) \rangle d\tau}{\int_{\tau} \langle E_x^2(\tau) \rangle d\tau} \quad (\text{C.8})$$

L'opérateur de valeur attendue dans les équations ci-dessus est donné pour un échantillonnage aléatoire et uniforme des (SOP en entrée et en sortie).

La valeur PMD_{EFF} consignée est la suivante:

$$PMD_{\text{EFF}} = \left[\frac{3}{2} (\sigma_x^2 - \sigma_0^2) \right]^{1/2} \quad (\text{C.9})$$

L'équation (C.9) est liée à l'équation (2) de la manière suivante [11]:

$$\frac{\int \Delta\tau^2(\nu) S_0^2(\nu) d\nu}{\int S_0^2(\nu) d\nu} = \frac{3}{2} (\sigma_x^2 - \sigma_0^2) \quad (\text{C.10})$$

En utilisant les définitions théoriques des termes de la largeur efficace à partir des équations (C.7) et (C.8), l'équation (C.10) est exacte pour toute courbe de DGD présente au moment de la mesure, et quelles que soient les caractéristiques spectrales de la source. La partie gauche de l'équation (C.10) est un calcul de la valeur efficace pondérée sur le spectre (par le carré de la puissance).

En utilisant l'hypothèse des conditions ergodiques:

$$\langle \Delta\tau^2 \rangle = \left\langle \frac{\int \Delta\tau^2(\nu) S_0^2(\nu) d\nu}{\int S_0^2(\nu) d\nu} \right\rangle \quad (\text{C.11})$$

Annexe D (informative)

Méthode d'évaluation des paramètres de Stokes utilisant la lumière rétroréfléchi

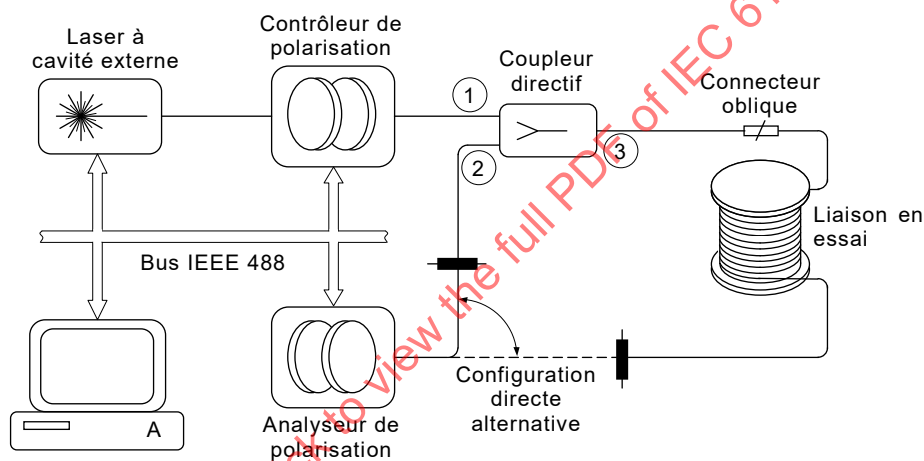
D.1 Fonctionnalité

Il est avéré que la méthode décrite dans la présente annexe génère des résultats adaptés pour des liaisons jusqu'à 40 km – sans amplificateurs [12].

D.2 Appareillage

D.2.1 Schéma fonctionnel

La Figure D.1 représente une disposition de l'appareillage.



IEC

Figure D.1 – Disposition pour la méthode D

La plupart des éléments de l'appareillage sont identiques à ceux de la méthode B. Les autres éléments sont décrits ci-dessous.

D.2.2 Coupleur directif

Le coupleur directif couple la lumière de la source dans la liaison et la lumière réfléchi par l'extrémité éloignée de la liaison dans l'analyseur de polarisation. Ce coupleur doit présenter une faible PMD (0,1 ps), une faible PDL (0,1 dB) et un faible affaiblissement de réflexion (supérieur à 50 dB). Par ailleurs, il convient qu'il reste stable pendant la mesure.

D.2.3 Connecteur oblique

Ce connecteur doit présenter un affaiblissement de réflexion supérieur à 50 dB pour éviter des signaux mixtes au niveau de l'analyseur de polarisation. Il convient que le cordon de connexion entre le coupleur et le connecteur oblique reste stable pendant la mesure.

D.2.4 Terminaison de l'extrémité éloignée

L'extrémité éloignée de la longueur d'onde doit réfléchir suffisamment de lumière vers le polarimètre pour détecter les SOP en sortie. Il peut être nécessaire de préparer une coupe lisse au niveau de l'extrémité perpendiculaire à l'axe de la fibre.

D.3 Procédure

La procédure pour la méthode D est identique à celle de la méthode B, sauf que l'extrémité d'entrée de la liaison est une entrée et une sortie pour l'équipement de mesure. En outre, le connecteur oblique situé au niveau de l'extrémité d'entrée de la liaison et l'extrémité de réflexion au niveau de l'extrémité de sortie de la liaison nécessitent une préparation spéciale.

D.4 Calcul et interprétation des résultats

Le calcul du DGD pour une longueur d'onde donnée est identique à celui de la méthode B. La différence est que la moyenne de ces valeurs de DGD n'est pas la valeur de la PMD de la liaison. Définir $\langle \Delta\tau_B \rangle$ comme la moyenne des mesures des DGD rétro réfléchis. La PMD (ps) de la liaison pour la zone de longueur d'onde mesurée est donnée par:

$$PMD = \frac{2}{\pi} \langle \Delta\tau_B \rangle \quad (D.1)$$

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61280-4-4:2017

Annexe E (informative)

Méthode du déphasage par modulation

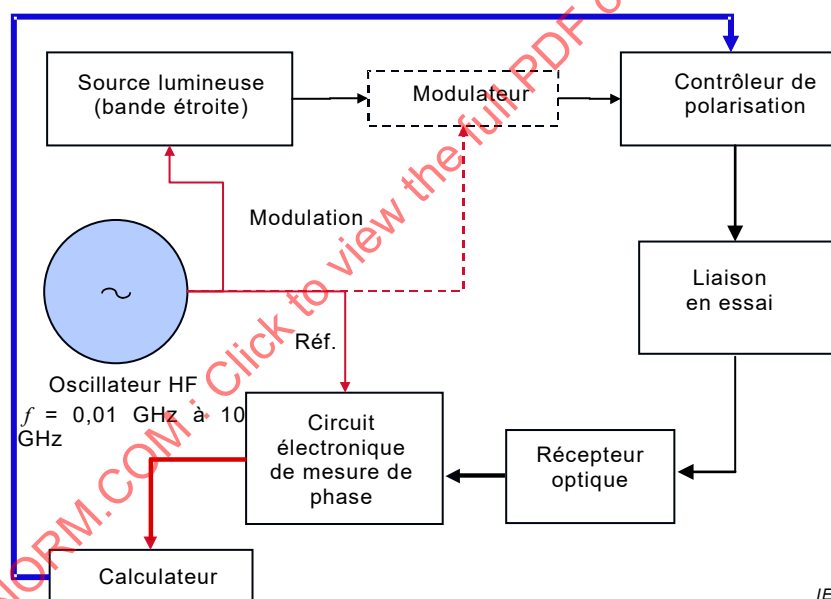
E.1 Appareillage

E.1.1 Présentation et schémas fonctionnels

Il existe deux techniques principales:

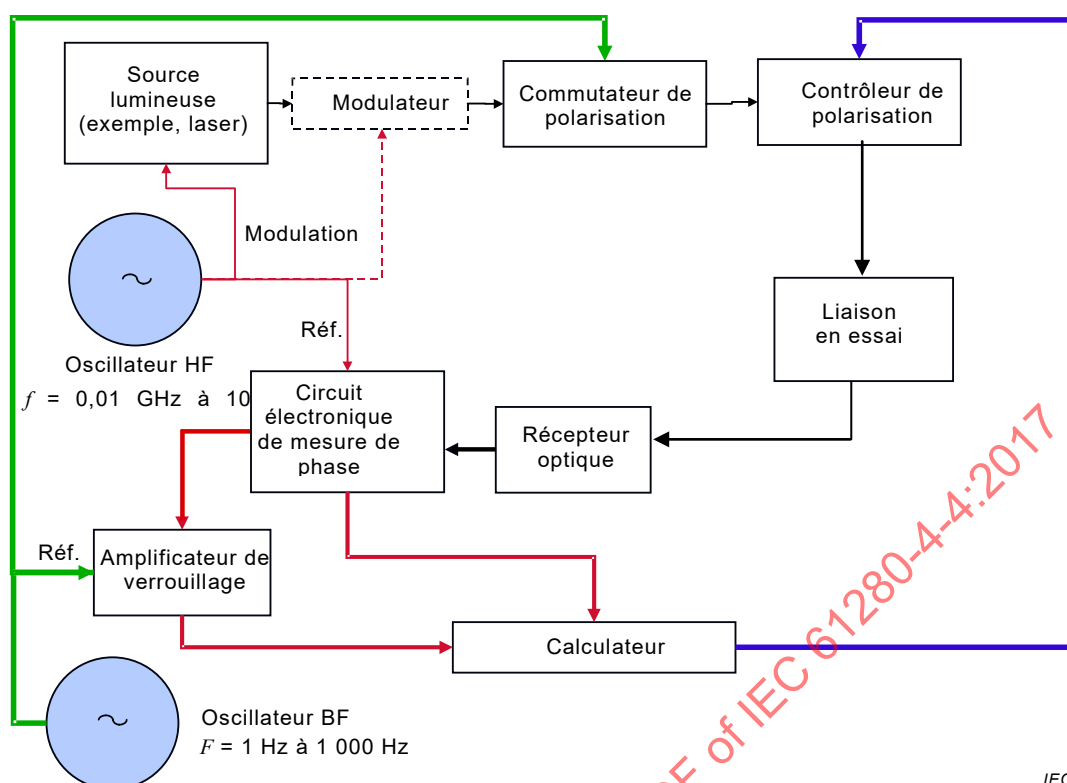
- une technique est fondée sur une recherche complète des SOP en entrée;
- une technique est fondée sur la mesure des SOP en sortie associée à un ensemble de Mueller de SOP en entrée.

La technique de recherche complète peut être mise en œuvre avec un contrôleur de polarisation simple ou avec un modulateur de polarisation associé à un contrôleur. La Figure E.1 représente une disposition du contrôleur simple, avec les connexions alternatives nécessaires au contrôle du chemin de référence de phase. La Figure E.2 représente une disposition dans le cas de la modulation de polarisation. L'appareillage de la Figure E.1 est suffisant pour effectuer la technique de l'ensemble de Mueller.



IEC

Figure E.1 – Appareillage de base



IEC

Figure E.2 – Disposition de l'appareillage pour la modulation de polarisation

E.1.2 Source(s) lumineuse(s)

E.1.2.1 Généralités

Pour la mesure du DGD pour chaque longueur d'onde spécifiée, utiliser plusieurs diodes laser, lasers accordables ou diodes électroluminescentes filtrés par un monochromateur ou un ou d'autres filtres. Dans le cas d'un système de mesure de longueur d'onde "arythmique", une question clé de la sélection du montage d'essai consiste à déterminer tout d'abord la taille d'échelon de la mesure exigée fondée sur le spectre du DUT, puis à sélectionner la largeur de raie de la source conformément au critère de Nyquist, sur la base de la taille d'échelon.

E.1.2.2 Diodes laser

Le spectre de la source laser, y compris la longueur d'onde centrale et la phase de sortie modulée, doit être stable pendant la période de mesure pour le courant de polarisation, la fréquence de modulation et la température de la diode observés.

Les diodes laser longitudinales unimodales avec contrôle de la température et stabilisation de la puissance de sortie (par exemple, rétroaction PIN) conviennent normalement aux fibres optiques unimodales (SMF – *single-mode optical fibres*).

E.1.2.3 Diodes électroluminescentes filtrées

Utiliser une ou plusieurs diodes électroluminescentes (LED). Le spectre de la LED, y compris la longueur d'onde centrale et la phase de sortie modulée doit être stable sur la période de la mesure pour le courant de polarisation, la fréquence de modulation et la température de la LED observés.

Filtrer le spectre optique de la LED pour obtenir une largeur de raie à mi-hauteur dans la plage comprise entre 1 nm et 5 nm. Un monochromateur peut être utilisé pour filtrer ou sélectionner la longueur d'onde.