

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Optical fibres –

Part 1-48: Measurement methods and test procedures – Polarization mode dispersion

Fibres optiques –

Partie 1-48: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Dispersion de mode de polarisation



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
Fax: +41 22 919 03 00
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 corrigenda or an amendment might have been published.

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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 also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 20 000 terms and definitions 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

65 000 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.

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: csc@iec.ch.

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.

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

Recherche de publications IEC - www.iec.ch/searchpub

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 aussi une fois par mois par email.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 20 000 termes et définitions 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

65 000 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.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Optical fibres –

Part 1-48: Measurement methods and test procedures – Polarization mode dispersion

Fibres optiques –

Partie 1-48: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Dispersion de mode de polarisation

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 33.180.10

ISBN 978-2-8322-4686-3

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.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms, definitions, symbols and abbreviated terms.....	8
3.1 Terms and definitions.....	8
3.2 Symbols and abbreviated terms	8
4 General	10
4.1 Methods for measuring PMD	10
4.2 Reference test method	13
4.3 Applicability	13
5 Apparatus.....	14
5.1 General.....	14
5.2 Light source and polarizers	14
5.3 Input optics	14
5.4 Input positioner	14
5.5 Cladding mode stripper	14
5.6 High-order mode filter	15
5.7 Output positioner	15
5.8 Output optics	15
5.9 Detector.....	15
5.10 Computer.....	15
6 Sampling and specimens	15
6.1 General.....	15
6.2 Specimen length	16
6.3 Deployment.....	16
6.3.1 General	16
6.3.2 Uncabled fibre	16
6.3.3 Optical fibre cable.....	16
7 Procedure.....	17
8 Calculation or interpretation of results	17
9 Documentation	17
9.1 Information required for each measurement	17
9.2 Information to be available.....	17
10 Specification information	18
Annex A (normative) Requirements specific to method A (FA) – Fixed analyser measurement method	19
A.1 Apparatus	19
A.1.1 Block diagrams.....	19
A.1.2 Light source.....	19
A.1.3 Analyser	20
A.2 Procedure	20
A.2.1 Wavelength range and increment.....	20
A.2.2 Complete the scans	20

A.3	Calculations	23
A.3.1	Approaches of calculating PMD	23
A.3.2	Extrema counting	23
A.3.3	Fourier transform	23
A.3.4	Cosine Fourier analysis	25
Annex B (normative)	Requirements specific to method B (SPE) – Stokes parameter evaluation method	30
B.1	Apparatus	30
B.1.1	Block diagram	30
B.1.2	Light source	30
B.1.3	Polarimeter	31
B.2	Procedure	31
B.3	Calculations	32
B.3.1	Principle	32
B.3.2	Jones matrix eigenanalysis (JME)	33
B.3.3	Poincaré sphere analysis (PSA)	34
B.3.4	State of polarization (SOP)	35
Annex C (normative)	Requirements specific to method C (INTY) – Interferometry method	36
C.1	Apparatus	36
C.1.1	Block diagram	36
C.1.2	Light source	39
C.1.3	Beam splitter	39
C.1.4	Analyser	39
C.1.5	Interferometer	39
C.1.6	Polarization scrambler	39
C.1.7	Polarization beam splitter	40
C.2	Procedure	40
C.2.1	Calibration	40
C.2.2	Routine operation	40
C.3	Calculations	44
C.3.1	General	44
C.3.2	TINTY calculations	44
C.3.3	GINTY calculations	45
Annex D (informative)	Determination of RMS width from a fringe envelope	47
D.1	Overview	47
D.2	RMS calculation for TINTY	47
D.3	RMS calculation for GINTY	49
Bibliography		51
Figure A.1	– Block diagrams for method A	19
Figure A.2	– Typical results from method A	22
Figure A.3	– PMD by Fourier analysis	25
Figure A.4	– Cross-correlation and autocorrelation functions	29
Figure B.1	– Block diagram for method B	30
Figure B.2	– Typical random mode coupling results from method B	32
Figure B.3	– Typical histogram of DGD values	33
Figure C.1	– Schematic diagram for method C (generic implementation)	36

Figure C.2 – Other schematic diagrams for method C	38
Figure C.3 – Fringe envelopes for negligible and random polarization mode coupling of TINTY-based measurement system	41
Figure C.4 – Fringe envelopes for mixed, negligible and random polarization mode coupling of GINTY-based measurement system	43
Figure D.1 – Parameters for interferogram analysis	47
Table A.1 – Cosine transform calculations	28

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60793-1-48:2017

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

OPTICAL FIBRES –

**Part 1-48: Measurement methods and test procedures –
Polarization mode dispersion**

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 60793-1-48 has been prepared by subcommittee 86A: Fibres and cables, of IEC technical committee 86: Fibre optics.

This third edition cancels and replaces the second edition published in 2007. It constitutes a technical revision. This edition includes the following significant technical change with respect to the previous edition:

- a) removal of the SOP approach.

The text of this standard is based on the following documents:

CDV	Report on voting
86A/1678/CDV	86A/1766/RVC

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

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

This International Standard is to be read in conjunction with IEC 60793-1-1:2008. A list of all parts in the IEC 60793 series, published under the general title *Optical fibres*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication 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) 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 average of DGD values.

In long fibre spans, DGD is random in both 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 $\langle\Delta\tau\rangle$, 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 $\langle\Delta\tau\rangle$ 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 lightwave system performance.

The term "PMD" is used both in the general sense of two polarization modes having different group velocities, and in the specific sense of the average DGD value (RMS $\langle\Delta\tau\rangle$ or MEAN $\langle\Delta\tau\rangle$). Although the DGD $\Delta\tau$ or pulse broadening $\Delta\delta$ is preferably averaged over frequency, for certain situations it may be averaged over time, or temperature.

The coupling length l_c is the length of fibre or cable at which appreciable coupling between the two polarization states begins to occur. If the fibre length L satisfies the condition $L \ll l_c$, mode coupling is negligible, and $\langle\Delta\tau\rangle$ scales with fibre length. The corresponding PMD coefficient is

$$\text{short-length PMD coefficient} = \langle\Delta\tau\rangle/L.$$

Fibres in practical systems nearly always have fibre lengths much greater than the coupling length and random mode coupling. When mode coupling is random, $\langle\Delta\tau\rangle$ scales with the square root of fibre length, and

$$\text{long-length PMD coefficient} = \langle\Delta\tau\rangle/\sqrt{L}.$$

OPTICAL FIBRES –

Part 1-48: Measurement methods and test procedures – Polarization mode dispersion

1 Scope

This part of IEC 60793 applies to three methods of measuring polarization mode dispersion (PMD), which are described in Clause 4. It establishes uniform requirements for measuring the PMD of single-mode optical fibre, thereby assisting in the inspection of fibres and cables for commercial purposes.

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 60793-1-1, *Optical fibres - Part 1-1: Measurement methods and test procedures - General and guidance*

IEC TR 61292-5, *Optical amplifiers - Part 5: Polarization mode dispersion parameter - General information*

ITU-T Recommendation G.650.2, *Definitions and test methods for statistical and non-linear related attributes of single-mode fibre and cable*

3 Terms, definitions, symbols and abbreviated terms

3.1 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in ITU-T Recommendation G.650.2 apply.

NOTE Further explanation of their use in this document is provided in IEC TR 61282-9.

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

Arg	Argument function
ASE	Amplified spontaneous emission
BBS	Broadband source
CFT	Cosine Fourier transform
c/c_0	Velocity of light in vacuum/in free space
DGD	Differential group delay
$DGD_{\max}$	Maximum DGD value

DOP	Degree of polarization
E	Number of extrema in $R(\lambda)$ (method A)
EC	Extrema counting
$f(\Delta\tau)$	Maxwell probability distribution
FA	Fixed analyser (method A)
FCFT	Fast cosine Fourier transform
FT	Fourier transform
FUT	Fibre under test
GINTY	General analysis for method C
INTY	Interferometry method (method C)
I/O	Input/output
JME	Jones matrix eigenanalysis (method B)
k	Mode coupling factor
l_c	Coupling length
L	Length of fibre/fibre cable test sample
LED	Light emitting diode
N	Total number of measurements/population of mode-coupled fibres/wavelength intervals
$P_A(\lambda)$	Optical power recorded with analyser in place (method A)
P_F	Probability of exceeding $DGD_{\max}$
$P_B(\lambda)$	Optical power recorded with analyser rotated 90 ° (method A)
$P_{TOT}(\lambda)$	Optical power recorded with analyser removed (method A)
$P_x(\tau)/P_x(\tau)$	Received power in the two orthogonal SOP axes corresponding to the fringes in method C
PBS	Polarization beam splitter
PDL	Polarization dependent loss
PDV	Polarization dispersion vector
PMD	Polarization mode dispersion
PMD_Q	Link design PMD value
PSA	Poincaré sphere analysis (method B)
PSP	Principle states of polarization
$R(\lambda)$	Output ratio from PMD measurement system (method A)
RBW	Resolution bandwidth
RTM	Reference test method
s	Normalized output Stokes vectors
SOP	State of polarization
SPE	Stokes parameter evaluation (method B)
T	Jones matrix
T^{-1}	Inverse of the Jones matrix
t_c	Optical source coherence time (method C)
TINTY	Traditional analysis for method C
α	Single parameter which specifies a Maxwell distribution
χ^2	Chi-squared variable

$\Delta \hat{h} / \Delta \hat{v} / \Delta \hat{q} / \Delta \hat{c}$	Finite differences computed from the Stokes vectors
$\delta \lambda$	Wavelength step size
$\Delta \lambda$	Optical source spectral width (full width half maximum (FWHM) unless otherwise noted)
$\delta \nu$	Optical frequency step size
$\Delta \theta$	Rotation angle on Poincaré sphere
$\delta \tau$	Arrival time of different polarization components of a signal or pulse broadening
$\Delta \delta \tau_{\max}$	Maximum $\delta \tau$ value that can be measured
$\Delta \delta \tau_{\min}$	Minimum $\delta \tau$ value that can be measured
$\Delta \tau$	DGD value
$\Delta \tau_{\max}$	Maximum DGD
$\langle \Delta \tau \rangle$	Average DGD over wavelength scan range or PMD value
$\sqrt{\langle \Delta \tau^2 \rangle}$	r.m.s. DGD over wavelength scan range or PMD value (method C)
$\langle \Delta \tau \rangle_0$	Maximum PMD specification that each fibre shall meet in a population of mode-coupled fibres
$\langle \Delta \tau \rangle_t$	Average DGD over time
$\langle \Delta \tau \rangle_T$	Average DGD over temperature
$\langle \Delta \tau \rangle_\lambda$	Average DGD over wavelength
$\Delta \omega$	Angular frequency variation in method B
λ	Test wavelength used to measure PMD
λ_0	Central wavelength of the light source
λ_1 / λ_2	First/last wavelength in set of test wavelengths (or position of first/last maximum or minimum in $R(\lambda)$ in method A)
ν	Optical light frequency
ρ_1 / ρ_2	Complex eigenvalues of $T(\omega + \Delta \omega) T^{-1}(\omega)$
σ	One-standard-deviation uncertainty
σ_0	r.m.s. width of the squared envelope of the autocorrelation interferogram (method C, GINTY)
σ_A	r.m.s. width of the autocorrelation envelope (method C)
σ_R	Second moment of FT data (method A)
σ_x	r.m.s. width of the squared envelope of the cross-correlation interferogram (method C, GINTY)
σ_ε	r.m.s. width of the cross-correlation envelope (method C, TINTY)
ω	Angular optical frequency
Ω	PDV

4 General

4.1 Methods for measuring PMD

Three methods are described for measuring PMD (see Annexes A, B and C for more details). The methods are listed below in the order of their introduction. For some methods, multiple approaches of analysing the measured results are also provided.

- a) Method A
 - 1) Fixed analyser (FA)
 - 2) Extrema counting (EC)
 - 3) Fourier transform (FT)
 - 4) Cosine Fourier transform (CFT)
- b) Method B
 - 1) Stokes parameter evaluation (SPE)
 - 2) Jones matrix eigenanalysis (JME)
 - 3) Poincaré sphere analysis (PSA)
- c) Method C
 - 1) Interferometry (INTY)
 - 2) Traditional analysis (TINTY)
 - 3) General analysis (GINTY)

The PMD value is defined in terms of the differential group delay (DGD), $\Delta\tau$, which usually varies randomly with wavelength, and is reported as one or another statistical metric. Equation (1) is a linear average value of the DGD values and is used for the specification of optical fibre cable. Equation (2) is the root mean square value which is reported by some methods. Equation (3) can be used to convert one value to the other if the DGDs are assumed to follow a Maxwell random distribution.

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

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

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

Equation (3) applies only when the distribution of DGDs is Maxwellian, for instance when the fibre is randomly mode coupled. The generalized use of Equation (3) can be verified by statistical analysis. A Maxwell distribution may not be the case if there are point sources of elevated birefringence (relative to the rest of the fibre), such as a tight bend, or other phenomena that reduce the mode coupling, such as a continual reduced bend radius with fibre in tension. In these cases, the distribution of the DGDs will begin to resemble the square root of a non-central Chi-square distribution with three degrees of freedom. For these cases, the PMD_{RMS} value will generally be larger relative to the PMD_{MEAN} that is indicated in Equation (3). Time domain methods such as method C and method A, cosine Fourier transform, which are based on PMD_{RMS} , can use Equation (3) to convert to PMD_{MEAN} . If mode coupling is reduced, the resulting reported PMD value from these methods can exceed those that can be reported by the frequency domain measurements that report PMD_{MEAN} , such as method B.

The PMD coefficient is the PMD value normalized to the fibre length. For normal transmission fibre, for which random mode coupling occurs and for which the DGDs are distributed as Maxwell random variables, the PMD value is divided by the square root of the length, and the PMD coefficient is reported in units of $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$. For some fibres with negligible mode coupling, such as polarization maintaining fibre, the PMD value is divided by the length, and the PMD coefficient is reported in units of ps/km .

All methods are suitable for laboratory measurements of factory lengths of optical fibre and optical fibre cable. For all methods, changes in the deployment of the specimen can alter the results. For installed lengths of optical fibre cable that may be moving or vibrating, either method C or method B is appropriate (in an implementation capable of millisecond measurement time scales).

All methods require light sources that are controlled at one or more states of polarization (SOPs). All methods require injecting light across a broad spectral region (i.e. 50 nm to 200 nm wide) to obtain a PMD value that is characteristic of the region (i.e. 1 300 nm or 1 550 nm). The methods differ in:

- a) the wavelength characteristics of the source;
- b) the physical characteristics that are actually measured;
- c) the analysis methods.

Method A measures PMD by measuring a response to a change of narrowband light across a wavelength range. At the source, the light is linearly polarized at one or more SOPs. For each SOP, the change in output power that is filtered through a fixed polarization analyser, relative to the power detected without the analyser, is measured as a function of wavelength. The resulting measured function can be analysed in one of three ways:

- a) by counting the number of peaks and valleys (EC) of the curve and application of a formula that has been shown [1]¹ to agree with the average of DGD values, when the DGDs are distributed as Maxwellian. This analysis is considered as a frequency domain approach;
- b) by taking the FT of the measured function. This FT is equivalent to the pulse spreading obtained by the broadband transmission of method C. Appropriate characterisation of the width of the FT function agrees with the average of DGD values, when the DGDs are distributed as Maxwellian;
- c) by taking the CFT of the difference of the normalized spectra from two orthogonal analyser settings and calculating the r.m.s. of the squared envelope. The PMDRMS value is reported. This is equivalent to simulating the fringe pattern of the cross-correlation function that would result from interferometric measurements.

Method B measures $\Delta\tau(\omega)$ by measuring a response to a change of narrowband light across a wavelength range. At the source, the light is linearly polarized at one or more SOPs. The Stokes vector of the output light is measured for each wavelength. The change of these Stokes vectors with angular optical frequency, ω , and with the (optional) change in input SOP yields the DGD as a function of wavelength through relationships that are based on the following definitions.

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

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

where

s is the normalized output Stokes vector;

Ω is the polarization dispersion vector (PDV) in the direction of the PSPs;

$\Delta\tau$ is the DGD.

For both the JME and PSA analysis approaches, three linear SOPs at nominally 0 °, 45 °, and 90 ° (orthogonal on the Poincaré sphere) shall be launched for each wavelength.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography

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

The PSA approach is completed by doing matrix algebra on the normalized output Stokes vectors to infer the rotation of the output Stokes vector on the Poincaré sphere at two adjacent wavelengths, using the application of an arcsine formula to obtain the DGD. The JME and PSA approaches are mathematically equivalent for common assumptions (see IEC TR 61282-9).

Method C is based on a broadband light source that is linearly polarized. The cross-correlation of the emerging electromagnetic field is determined by the interference pattern of output light, i.e. the interferogram. The determination of the PMD delay for the wavelength range associated with the source spectrum is based on the envelope of the fringe pattern of the interferogram. Two analyses are available to obtain the PMD delay (see IEC TR 61282-9), both of which measure the PMD_{RMS} value:

- a) TINTY uses a set of specific operating conditions for its successful applications and a basic setup;
- b) GINTY uses no limiting operating conditions but, in addition to the same basic set-up as TINTY, it uses a modified setup.

The analysis approaches represent an evolution of the understanding of PMD. The GINTY is, for example, more complete than TINTY. The reproducibility of PMD depends on the PMD level and the wavelength range of the measurement [3]. Better relative reproducibility is achieved for broader wavelength ranges and higher PMD values for a given range. For measurements of higher PMD values, for example 0,5 ps, the differences in the analysis methods are less important than for the measurements of low PMD values.

Information common to all three methods is contained in Clauses 4 to 10, and requirements pertaining to each individual method appear in Annexes A, B, and C, respectively. IEC TR 61282-9 provides the mathematical formulations for all methods.

4.2 Reference test method

Method B is the reference test method (RTM), which shall be the one used to settle disputes.

4.3 Applicability

PMD in fibre is a statistical parameter. IEC 60794-3 includes a statistical requirement on PMD, called PMD_Q or link design value that is based on sampled measurements of optical fibre cable and calculations for concatenated links. The PMD of a cabled fibre can vary from the PMD of the uncabled fibre due to effects of cable construction and processing. A limit on the PMD_Q of the uncabled fibre is, however, required to limit the PMD_Q on cabled fibre. Uncabled fibre PMD_Q less than half the cabled fibre PMD_Q limit is generally considered as a conservative rule. Alternative limits may be determined for particular constructions and stable cable processes.

The fibre or cable deployment should be selected so that externally induced mode coupling is minimized. Sources of such external mode coupling can be:

- a) excessive tension;
- b) excessive bending induced from
 - 1) fibre cross-overs on a shipping reel;
 - 2) crimping of fibre within a cable on a spool that is too small;
 - 3) too small a bend radius.
- c) excessive twist.

Reproducibility of individual measurements should be evaluated after perturbing the fibre to allow sampling the full range of mode coupling combinations. This can be done by, for example, changing the temperature slightly or making small adjustments in the deployment. Gisin [3] reported a fundamental relative reproducibility limit for measurements and showed that the relative reproducibility improves as the PMD increases and as the spectral width of the source increases. When PMD measurements are combined to evaluate the statistical specification of optical fibre cable (see IEC 60794-3), this variability leads to a possible overstatement of the link design value.

Guidelines for the calculation of PMD for systems that include other components such as dispersion compensators or optical amplifiers are given in IEC TR 61282-3. Test methods for optical amplifiers are given in IEC 61290-11-1 and IEC 61290-11-2, and other design guides in IEC TR 61292-5. Test methods for testing links, including amplified ones, are given in IEC 61280-4-4. Test methods for optical components are given in IEC 61300-3-32. General information about PMD, the mathematical formulation related to the application of the present methods, and some considerations related to the sampling theory related to the use of different light sources and detection systems are given in IEC TR 61282-9.

5 Apparatus

5.1 General

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

5.2 Light source and polarizers

See Annexes A, B, and C 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. IEC TR 61282-9 provides additional guides concerning the source input SOP, degree of polarization (DOP), use of polarizers and polarization controllers.

5.3 Input optics

An optical lens system or fibre pigtail may be employed to excite the specimen. It is recommended that the power coupled into the specimen be relatively insensitive to the position of its input end face. This can be accomplished by using a launch beam that spatially and angularly overfills the input end face.

If using a butt splice, employ index-matching material between the fibre pigtail and the specimen to avoid interference effects. The coupling shall be stable for the duration of the measurement.

5.4 Input positioner

Provide means of positioning the input end of the specimen to the light source. Examples include the use of x-y-z micropositioner stages, or mechanical coupling devices such as connectors, vacuum splices, three-rod splices, etc. The position of the fibre shall remain stable over the duration of the measurement.

5.5 Cladding mode stripper

Use a device that extracts cladding modes. Under some circumstances the fibre coating will perform this function.

5.6 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 (see IEC 60793-1-44) of the specimen. For example, a one-turn bend of radius of 30 mm on the fibre is generally sufficient.

5.7 Output positioner

Provide a suitable means for aligning the fibre output end face to the output optics. Such coupling may include the use of lenses, or may be a mechanical connector to a detector pigtail.

Provide means such as a side-viewing microscope or camera with a crosshair to locate the fibre at a fixed distance from the output optics. It may be sufficient to provide only longitudinal adjustment if the fibre is constrained in the lateral plane by a device such as a vacuum chuck.

5.8 Output optics

See Annex A, B, or C, as appropriate.

5.9 Detector

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

5.10 Computer

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

6 Sampling and specimens

6.1 General

A specimen is a known length of single-mode optical fibre (IEC 60793-2-50) which may or may not be cabled. The sample and pigtails shall be fixed in position at a nominally constant temperature throughout the measurement. Standard atmospheric conditions are defined in IEC 60793-1-1 and shall be employed unless otherwise specified. In the case of installed fibres and cables, prevailing deployment conditions may be used.

Mechanical and temperature stability of the test device may be observed by the following procedures. For method A, the output power from the fibre at a fixed wavelength is measured with the output analyser in place. In a time period corresponding to a typical complete measurement, the output power change should be small relative to the changes produced by a wavelength increment. For method B, the output SOP of the test fibre on a Poincaré sphere display is viewed. In a time period corresponding to an adjacent pair of Jones matrix measurements, the output SOP change should be small relative to the change produced by a wavelength increment. Method C is normally robust with regard to slight temperature change or fibre movements.

End faces for the input and output ends of the test sample shall be prepared as appropriate for the requirements of the apparatus and procedure. Precautions shall be taken to avoid any reflections.

6.2 Specimen length

The specimen length is dictated by three factors:

- a) minimum desired PMD coefficient;
- b) mode coupling regime;
- c) signal to noise ratio.

Each test method and implementation is limited to a minimum PMD value (ps) that can be measured. In many cases, this minimum can be determined based on theory. It can also be determined experimentally by examining the measured distribution. For fibres in the random mode coupling regime, the minimum PMD coefficient is determined by dividing the PMD value by the square root of the fibre length (km). For the negligible mode coupling case, the division is by the length. The length that is measured and the minimum measurable PMD value will therefore determine the minimum measurable PMD coefficient. Fibres or cables with lengths sufficient to achieve this minimum can be selected for measurement. Alternatively, specimens can be cut to a satisfactory length. The minimum measurable PMD value shall be documented. The length of the individual specimens shall be recorded. The length can also be limited by the deployment method (see 6.3) and instrument dynamic range.

The values specified in IEC 60794-3 and IEC 60793-2-50 express the PMD coefficient in terms of $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$. In effect, these documents assume that the length measured is sufficient to induce the randomly mode-coupled regime. For a given fibre type or cable construction, this can be confirmed by doing a cut-back experiment in which the PMD value is measured on a specimen at each of several lengths achieved by cutting the specimen back between measurements. Lengths above which there is a square root dependence of the PMD value on length may be considered as randomly mode-coupled.

The dynamic range is limited by the method, the source power, and the overall loss of the specimen, which is affected by length. This limit shall generally be determined based on of specific implementations by experimental means. This limit shall be documented.

6.3 Deployment

6.3.1 General

The deployment of the fibre or cable can influence the result. For normal measurements to be used in specification conformance evaluation, the following requirements apply.

6.3.2 Uncabled fibre

It is important to minimize deployment-induced mode coupling when measuring uncabled fibres, which is done in order to support the primary requirements of cabled fibre PMD_Q . In this case, the fibre shall be supported in some manner (usually on a reel having a minimum wind radius of 150 mm), with essentially zero fibre tension (typically less than 5 g), and no tensioned crossovers. These deployment requirements can limit the length that can be measured, depending on the spool diameter, and can make the measurement a destructive one. Multi-layer windings are possible, but should be qualified by comparison to single-layer results on shorter lengths.

The measurement of uncabled fibre deployed on shipping spools is not recommended. PMD results with this deployment have been shown to be substantially less than what would be obtained in cable form for high PMD fibre and substantially greater than what would be obtained in cable form for low PMD fibre.

6.3.3 Optical fibre cable

PMD measurements on fibres in cables wound on shipping drums cannot always reflect the functionally relevant PMD values for fibres in the installed cable deployment configuration.

Consequently, to demonstrate compliance with the cabled-fibre PMD specification, alternative deployment configurations or mapping functions relating on-drum PMD value to off-drum PMD value can be used for factory measurements. The exact deployment configuration shall be agreed upon between the supplier and the customer.

7 Procedure

The procedure is as follows:

- a) Deploy the fibre or cable and prepare the ends.
- b) Attach the ends to the input and output optics.
- c) Engage the computer to complete the scans and measurements found in Annexes A, B, and C for the three measurement methods.
- d) Complete documentation.

8 Calculation or interpretation of results

Annexes A, B, and C provide calculations to convert the measured data into PMD values. The calculation of the PMD coefficient is carried out according to whether random mode coupling or negligible mode coupling is present. For the fibres specified in IEC 60793-2-50, the PMD value is normalized by the square root of the fibre length in units of $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$.

9 Documentation

9.1 Information required for each measurement

- a) Specimen identification;
- b) Testing date;
- c) Specimen length;
- d) Wavelength region (for example, 1 550 nm);
- e) PMD in units of ps, and whether PMD_{MEAN} or PMD_{RMS} is reported;
- f) PMD coefficient and its units ($\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ or ps/km).

9.2 Information to be available

- a) Measurement method used;
- b) Calculation approach used;
- c) Description of the deployment method (including any fibre support mechanism);
- d) Wavelength range used;
- e) For methods A and B with a narrowband source and a step mode, the number of wavelengths sampled;
- f) For method C, the type of fringe-detection technique;
- g) Description of the equipment;
- h) Date of latest calibration;
- i) Evidence supporting the mode coupling regime (indicated by units of the PMD coefficient);
- j) For method B with narrowband source and a step mode, the wavelength range resolution;
- k) For method B with broadband source (BBS), the centre wavelength and -3 dB linewidth.
- l) Any deviations from this procedure

10 Specification information

- a) Type of fibre or cable;
- b) Failure or acceptance criteria.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60793-1-48:2017

Annex A (normative)

Requirements specific to method A (FA) – Fixed analyser measurement method

A.1 Apparatus

A.1.1 Block diagrams

Figure A.1 shows possible block diagrams for method A.

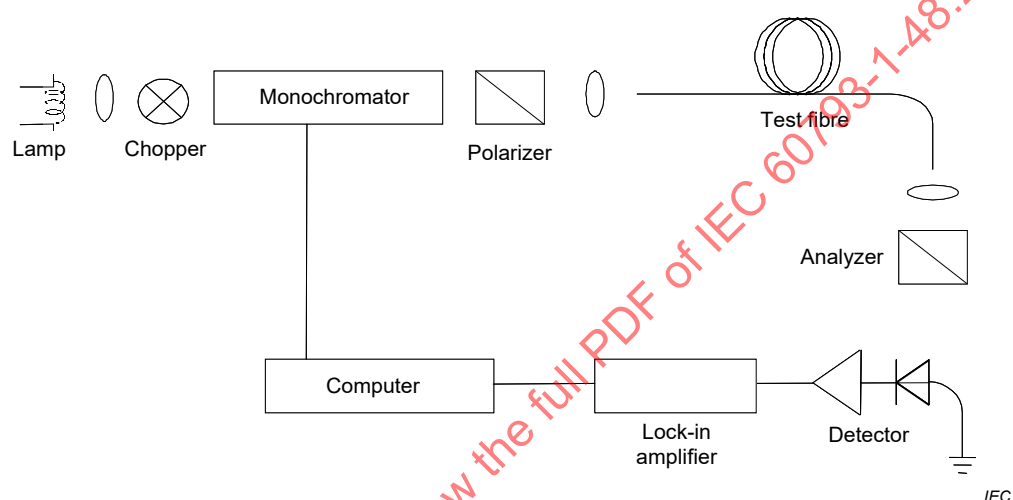


Figure A.1a – Narrowband source

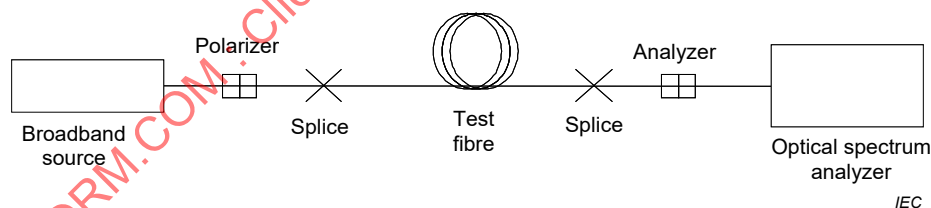


Figure A.1b – Broadband source

Figure A.1 – Block diagrams for method A

A.1.2 Light source

In all cases, two kinds of light sources may be used, depending on the type of analyser. A narrowband source such as the broadband lamp and monochromator combination shown in Figure A.1a can be used with a polarization analyser. A BBS shown in Figure A.1b can be used with a narrow bandpass filtering analyser such as an optical spectrum analyser or an interferometer used as a FT spectrum analyser placed before the analyser. In the case of BBS, 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 degree of polarization (see 4.1). In both cases, the range of wavelengths shall be sufficient to provide a PMD measurement of sufficient precision at the specified wavelength region (see Clause A.3).

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

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

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 Analyser

The angular orientation of the analyser is not critical but should remain fixed throughout the measurement. With negligible mode coupling or low PMD values, some adjustment of the analyser may be helpful in maximising the amplitude of the oscillations in Figure A.2 – which can also be achieved by rotating the fibre at splices or connectors. For the CFT approach, the analyser shall be capable of being rotated to a setting that is orthogonal to the initial setting.

NOTE The analyser can be replaced by a polarimeter.

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 or optical frequency increment once with the analyser in the optical path and once without – or once with the analyser in the optical path and once with the analyser set to a position orthogonal to the initial setting. 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 FT or CFT approaches are used, the step size 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 randomly mode-coupled fibres, the Nyquist condition shall be at least three times the frequency of the second moment for the maximum anticipated DGD. That is:

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

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

A.2.2 Complete the scans

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

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

Calculate the power ratio, $R(\lambda)$ as follows. Figure A.2 shows an example of both negligibly and randomly mode-coupled results.

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

An alternative procedure is to leave the analyser 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 ratio, P_A/P_B , can also be used when extrema counting is used.

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60793-1-48:2017

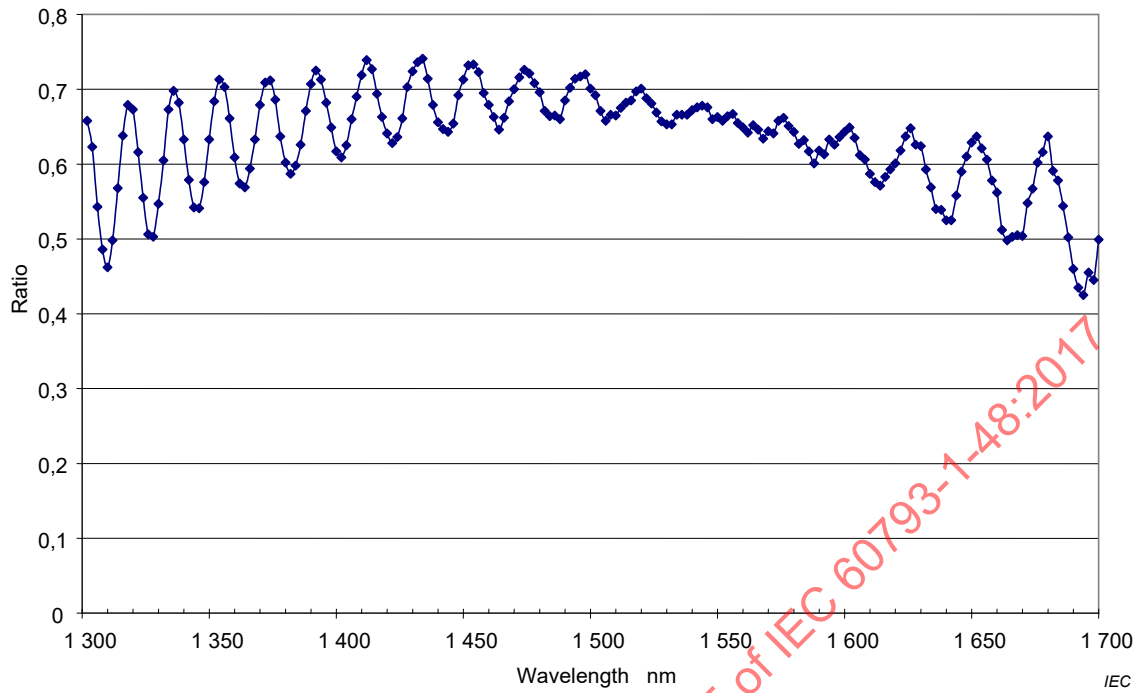


Figure A.2a – Negligible mode coupling

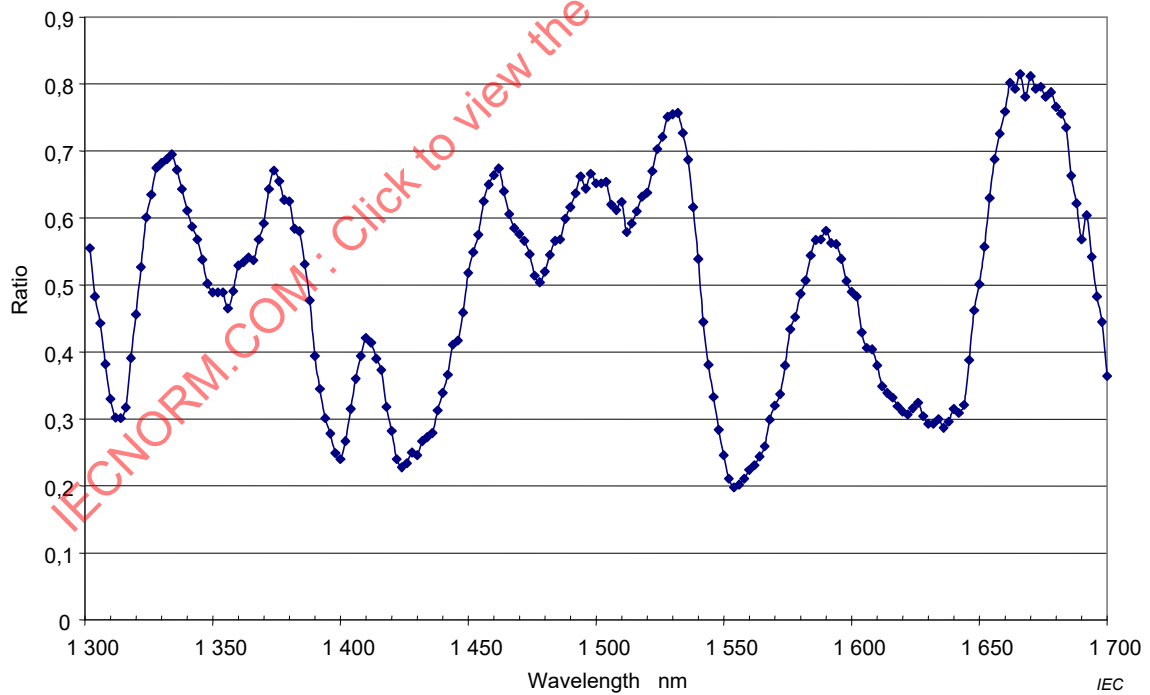


Figure A.2b – Random mode coupling

Figure A.2 – Typical results from method A

A.3 Calculations

A.3.1 Approaches of calculating PMD

There are three approaches of calculating PMD from the R function that is measured:

- a) extrema counting;
- b) Fourier transform;
- c) cosine Fourier transform.

A.3.2 Extrema counting

The function, $R(\lambda)$, should be obtained at equally spaced wavelength intervals from a minimum wavelength of λ_1 to a maximum wavelength of λ_2 . E is the number of extrema (both maxima and minima) within the window. Alternatively, the wavelength range can be redefined so that λ_1 and λ_2 coincide with extrema, in which case E is the number of extrema (including λ_1 and λ_2) minus one. The formula for the PMD value, $\langle \Delta\tau \rangle$, is:

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{kE\lambda_1\lambda_2}{2c(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (\text{A5})$$

where

c is the speed of light in vacuum;

k is a mode coupling factor which equals 1,0 in the absence of random mode coupling and 0,82 in the limit of random mode coupling.

If a polarimeter is used as the detection element, the average of the values derived from the three normalised Stokes parameter responses is taken as the final value of PMD.

In the presence of noise, the extrema can be difficult to determine. One solution is to fit the data to a running polynomial that can be evaluated for extrema at every point. A cubic polynomial that covers eight wavelengths has been used successfully.

A.3.3 Fourier transform

A.3.3.1 General

In this method, a Fourier analysis of $R(\lambda)$, usually expressed in the optical frequency domain 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 $\delta\tau$. This data is post-processed as described below to derive the expected PMD, $\langle \Delta\tau \rangle$, for the fibre under test. This method is applicable to fibres with negligible or random mode coupling.

A.3.3.2 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 may 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 may 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 transform is now carried out, to yield the amplitude data distribution $P(\delta\tau)$ for each value of $\delta\tau$.

A.3.3.3 Transform data fitting

Fourier transform data at zero $\delta\tau$ has little meaning since, unless carefully removed, DC components in $R(\lambda)$ may be partially due to insertion loss of the analyser 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 three, unless zero-padding is used in the Fourier analysis. In that case, the value of X can be determined from three times the number of original data points divided by the total length of the array after zero-padding.

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

A.3.3.4 PMD calculation for fibres with negligible mode coupling

For a negligibly coupled fibre (e.g., a high birefringence fibre) or for a birefringent component, $R(\lambda)$ resembles a chirped sine wave (Figure A.2a). Fourier transform 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 $\langle\Delta\tau\rangle$.

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:

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

where

$M' + 1$ 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 may 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.3.3.5 PMD calculation for fibres with random mode coupling

In instances of random mode coupling, $R(\lambda)$ becomes a complex waveform similar to Figure A.2b, 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 combination of autocorrelation and cross-correlation functions of light pulse arrival times, $\delta\tau$, in the fibre (see Figure A.3).

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 $\langle\Delta\tau\rangle$, and is given by:

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

A.3.3.6 PMD calculation for mixed coupling fibre systems

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

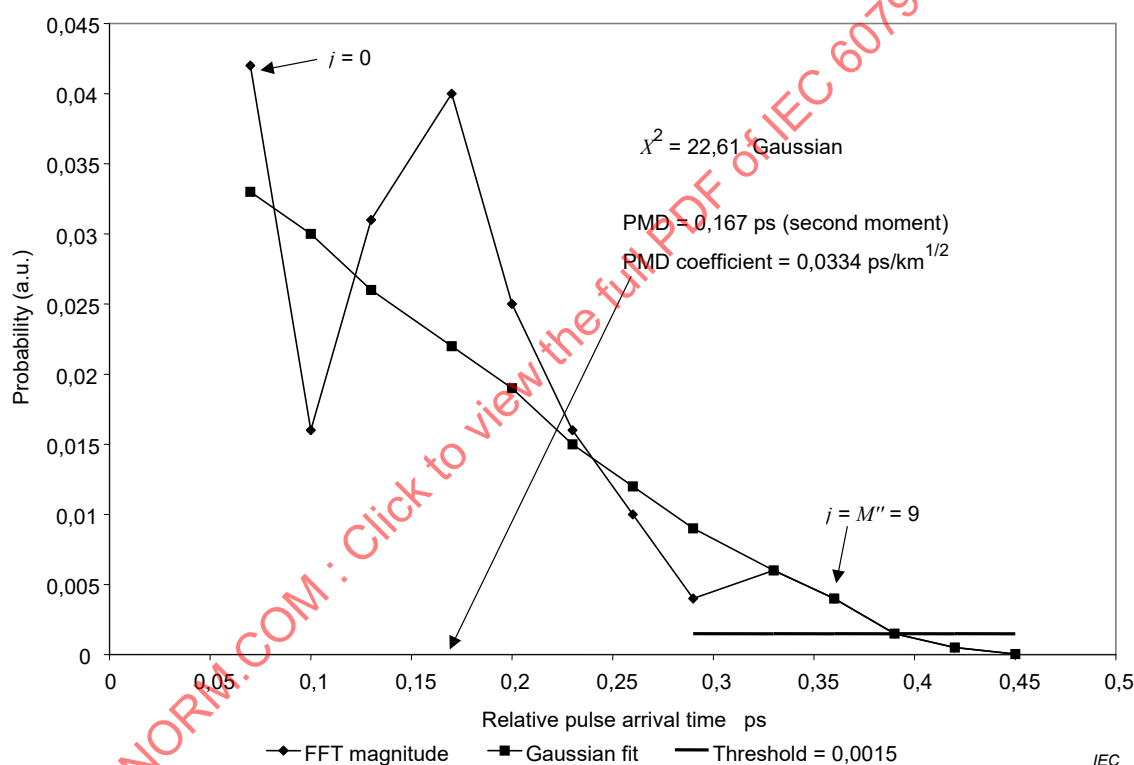


Figure A.3 – PMD by Fourier analysis

A.3.4 Cosine Fourier analysis

A.3.4.1 General

This analysis is based on the observation that the cosine Fourier transform of the spectrum emitted from the analyser is the fringe pattern of the interferogram that would be obtained from method C. The difference between fringe patterns generated by the analyser being set at two orthogonal settings is the cross-correlation function. For an infinite spectrum into the analyser, the autocorrelation function would have zero width. In practice, the finite source spectrum in the optical frequency domain acts as a windowing function which produces a non-zero autocorrelation function width in the time domain.

The analysis of the squared cross-correlation and autocorrelation functions found in the method C, GINTY analysis [4] shows that the difference in squared RMS widths of these

functions is proportional to the square of the spectrally weighted RMS (by squared power) of the DGD values (see Equation (C.9)) .

The result is independent of the spectral shape which means that the details of the windowing function are fully taken into account. It is also independent of the degree of mode coupling, which means that no changes in algorithm are needed to treat the different mode coupling regimes.

The result is limited by the spectral width and optical frequency increment that is measured. As the PMD increases, the frequency increment shall be decreased. At some limit it would be more practical to use the method C (GINTY).

The analysis reports the PMD_{RMS} metric. If random mode coupling is present, the result can be converted to PMD_{MEAN} using Equation (3).

A.3.4.2 Overview

The measurement of the powers emitted from the analyser set at two orthogonal settings is required. The ratio, R , associated with Equation (A.4) is modified to:

$$R(\nu) = \frac{P_A(\nu) - P_B(\nu)}{P_A(\nu) + P_B(\nu)} \quad (A.8)$$

where

$\nu = c / \lambda$ is the optical frequency (THz).

If a polarimeter is used, the three normalized output Stokes vector elements are equivalent to three independent normalized ratios equivalent to that represented by Equation (A.8). Each Stokes vector element is the difference in powers between orthogonal analyser settings. The three elements are different in that the base settings are also orthogonal.

The data is multiplied by a windowing function, $W(\nu)$, that goes to zero smoothly at the edges. Both $R(\nu)W(\nu)$ and $W(\nu)$ are put into arrays with zero padding at lower, unmeasured frequencies. Fast cosine Fourier transforms (FCFT) are applied to each array to obtain the time domain fringe envelopes, $r(t)w(t)$ and $w(t)$. These are squared to obtain the squared cross-correlation and autocorrelation envelopes, E_x^2 and E_0^2 , respectively. When multiple ratio functions (N) are available from different combinations of input polarizer setting and base analyser settings (or different Stokes output vector elements), using for instance input/output SOP scrambling, form the mean square envelopes as:

$$\overline{E_x^2} = \frac{1}{N} \sum_i E_{xi}^2 \quad (A.9)$$

$$\overline{E_0^2} = \frac{1}{N} \sum_i E_{0i}^2 \quad (A.10)$$

Using the RMS calculation of Annex D.2, calculate the RMS widths, σ_x and σ_0 of these two functions. The PMD_{RMS} value is calculated as:

$$PMD_{RMS} = \sqrt{\left[\frac{3}{2} (\sigma_x^2 - \sigma_0^2) \right]} \quad (A.11)$$

It is related to the spectrally weighted (by squared window value) RMS of the DGDs as:

$$\langle PMD_{RMS} \rangle = \frac{\int \Delta\tau^2(\nu) W^2(\nu) d\nu}{\int W^2(\nu) d\nu} \quad (A.12)$$

The expected value operator is with respect to random input/output SOPs.

A.3.4.3 Details

This subclause explains some of the details with respect to the measured frequency window, the frequency increment, $\Delta\nu$, frequency shifting, and the result of the FCFT. An example of a FCFT algorithm may be found in [5].

The data shall be available in uniform frequency increments. The number of data points, including zero pad values, shall be $1+2^k$, with k an integer.

If the N measured data points are not taken in uniform frequency increments, they may be fitted to a polynomial such as a spline for interpolation. A cubic spline [6] with $N - 3$ uniform segments will fit all the data perfectly and allow interpolation.

Given that the measured data are bounded by $\nu_{\min M}$ and $\nu_{\max M}$ and the fact that the minimum optical frequency is well above zero, the application of frequency shifting can be used to reduce the size of the arrays that are processed. The boundaries of the frequencies used in the calculation array can be selected by any choice of n such that:

$$\nu_{\max} \frac{n-1}{n} = \nu_{\min} \leq \nu_{\min M}, \quad \nu_{\max} = \nu_{\max M}, \quad \text{and } n \text{ is a positive integer.} \quad (A.13)$$

The frequency values less than the measured frequency are filled with zeros.

Following the FCFT, the array will contain the time domain fringe pattern from times of 0 to $t_{\max} = \Delta t 2^k$, where the time increment, Δt , is given as:

$$\Delta t = \frac{n}{2\nu_{\max}} = \frac{1}{2(\nu_{\max} - \nu_{\min})} \quad (A.14)$$

The fringe pattern that would be obtained from interferometry extends to negative time values as well as positive time values. The value at a given negative time is equal to the value at the positive time. The function is even and symmetric about zero.

The selection of the frequency shift should be done keeping in mind that the RMS width calculation needs some time domain values that are less than the minimum PMD_{RMS} that is measurable.

The frequency increment, $\Delta\nu$, is also related to the number of points sampled, the frequency shift, and the maximum PMD_{RMS} that is to be measured. It is given as the following, along with the constraint as:

$$\Delta\nu = \frac{\nu_{\max} - \nu_{\min}}{2^k} \leq \frac{1}{24 PMD_{RMS-\max}} \quad (A.15)$$

The spectral width of the filtered source should be half of this value. When the actual scan is done in equal wavelength increments, the wavelength increment at the lower end of the range should be consistent with the constraint of Equation (A.14).

The windowing function, $W(v)$, can technically be any function, including a square function. The function that is chosen should be one that minimizes the value of σ_0 . Functions that do this proceed to zero at the edges in a continuous way and should have the first derivative proceed to zero at the edges. This will minimize the ringing that can increase σ_0 .

A.3.4.4 Examples

Table A1 shows a sample calculation spreadsheet. The wavelength extrema and k are entered. For each of several possible frequency shift values, n , the other parameters are calculated. minPMD is calculated as $3\Delta t$. The increment in terms of $\Delta\lambda$ at the lower wavelength limit is also presented. Clearly, there are trade-offs, depending on the range of PMD_{RMS} values that are to be measured. In general, the broader the wavelength range and the smaller the frequency increment, the better.

Table A.1 – Cosine transform calculations

c	299792,5	nm/ps				
k	11					
npt	2048					
wavelengths (nm)		frequencies (THz)				
max	1700	230,6096				
min	1300	176,3485				
Frequency shift						
n	freqmincalc (THz)	del-t (ps)	delfreq (THz)	minPMD (ps)	maxPMD (ps)	wave increment (nm)
1	0	0,002168	0,112602	0,006504	0,370034	0,635076
2	115,3048077	0,004336	0,225205	0,013009	0,185017	1,270772
3	153,7397436	0,006504	0,337807	0,019513	0,123345	1,90709
4	172,9572115	0,008673	0,450409	0,026018	0,092508	2,544031
5	184,4876923	0,010841	0,563012	0,032522	0,074007	3,181596
6	192,1746795	0,013009	0,675614	0,039027	0,061672	3,819785
7	197,6653846	0,015177	0,788216	0,045531	0,052862	4,458599
8	201,7834135	0,017345	0,900819	0,052036	0,046254	5,098039

Figure A.4 illustrates the results for what might be obtained from a fibre with $PMD_{RMS} = 0,2$ ps. The mean cross-correlation and mean autocorrelation envelopes from a single scan using a windowing function that is Gaussian with a standard deviation of 23 nm are shown. The result is from a simulation of a fibre with ideal random mode coupling. The measured result for this simulation was 0,185 ps.

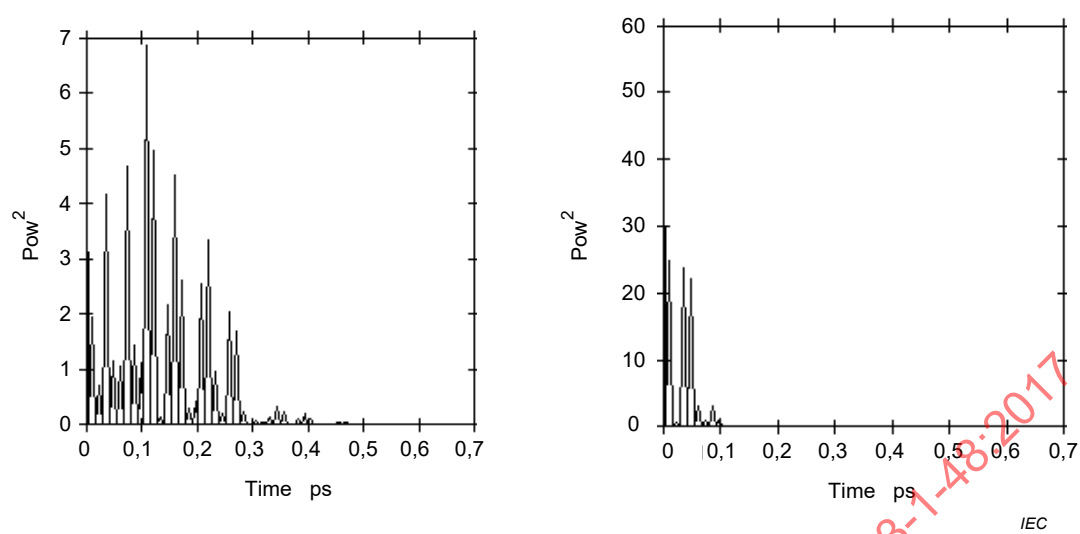


Figure A.4 – Cross-correlation and autocorrelation functions

Annex B (normative)

Requirements specific to method B (SPE) – Stokes parameter evaluation method

B.1 Apparatus

B.1.1 Block diagram

Figure B.1 shows a possible block diagram for method B.

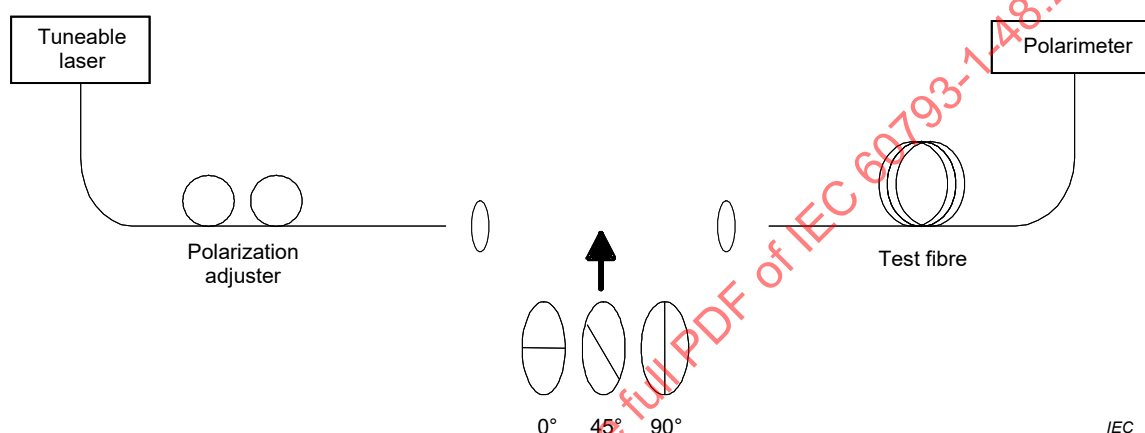


Figure B.1a – Narrowband source (JME)

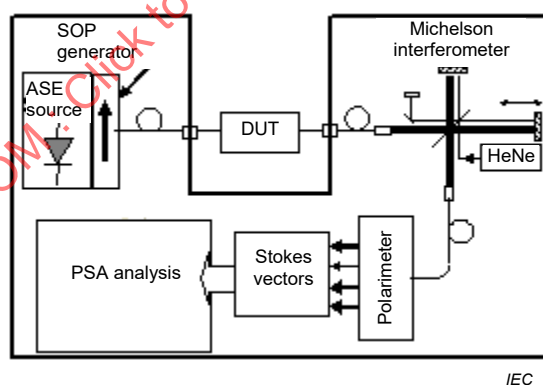


Figure B.1b – Broadband source (PSA)

Figure B.1 – Block diagram for method B

B.1.2 Light source

In all cases, two kinds of light sources may be used, depending on the type of polarimeter. A narrowband source such a tuneable laser shown in Figure B.1a can be used with a polarization analyser. Alternatively, a BBS shown in Figure B.1b can be used with a narrow bandpass filtering polarimeter such as an optical spectrum analyser or an interferometer used as a FT spectrum analyser placed before the polarimeter. In the case of BBS, 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 3.1). In both cases, the range of wavelengths shall be sufficient to provide a PMD measurement of sufficient precision at the specified wavelength region (see Clause B.3).

For the JME and PSA approaches, the polarizer shall be capable of switching between three linear SOPs that are orthogonal (nominally 0°, 45°, and 90°) for each wavelength measured.

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 fibre is coupled to the polarimeter. The wavelengths are scanned across a range appropriate for the wavelength region and desired precision (see Clause 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 wavelength of the region measured, λ_0 , and the speed of light in vacuum, c , 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 PSP 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 interval used for a measurement was too large, the measurement may be repeated with smaller wavelength interval. If the shape of the curve of DGD versus wavelength and the mean DGD are essentially unchanged, the original wavelength interval was satisfactory.

For BBSs, the resolution bandwidth (RBW) of the analyser shall satisfy the following:

$$\text{RBW} \leq \frac{\lambda_0^2}{5c\Delta\tau_{\max}} \quad (\text{B.2})$$

The measurement data is gathered for each wavelength. For the JME and PSA calculation approaches, the three input SOPs are cycled between nominal 0°, 45°, and 90° for each wavelength are recorded for the corresponding vectors. For the PSA and JME approaches, the output vectors are normalized to unit length and recorded as $\hat{H}$, $\hat{Q}$, and $\hat{V}$ for the three input SOPs, respectively.

B.3 Calculations

B.3.1 Principle

All three calculation approaches require evaluation of differences between the SOP at one angular optical frequency, ω_0 , and the next at $\omega_0 + \Delta\omega$. (Angular optical frequency is given by $\omega = 2\pi c/\lambda$.) All three calculation approaches result in a series of DGD values versus wavelength. For negligible mode coupling, the DGD values are typically constant versus wavelength. For random mode coupling, the DGD values typically vary versus wavelength as shown in Figure B2. Alternatively, the DGD values may be displayed as a histogram such as Figure B.3. The average of these DGD values is reported as the PMD value that is used in conjunction coefficient.

The detailed mathematical formulation and the calculations pertaining to method B for the three approaches, as well as the theoretical linkage between the JME and PSA calculation approaches are given in IEC TR 61282-9.

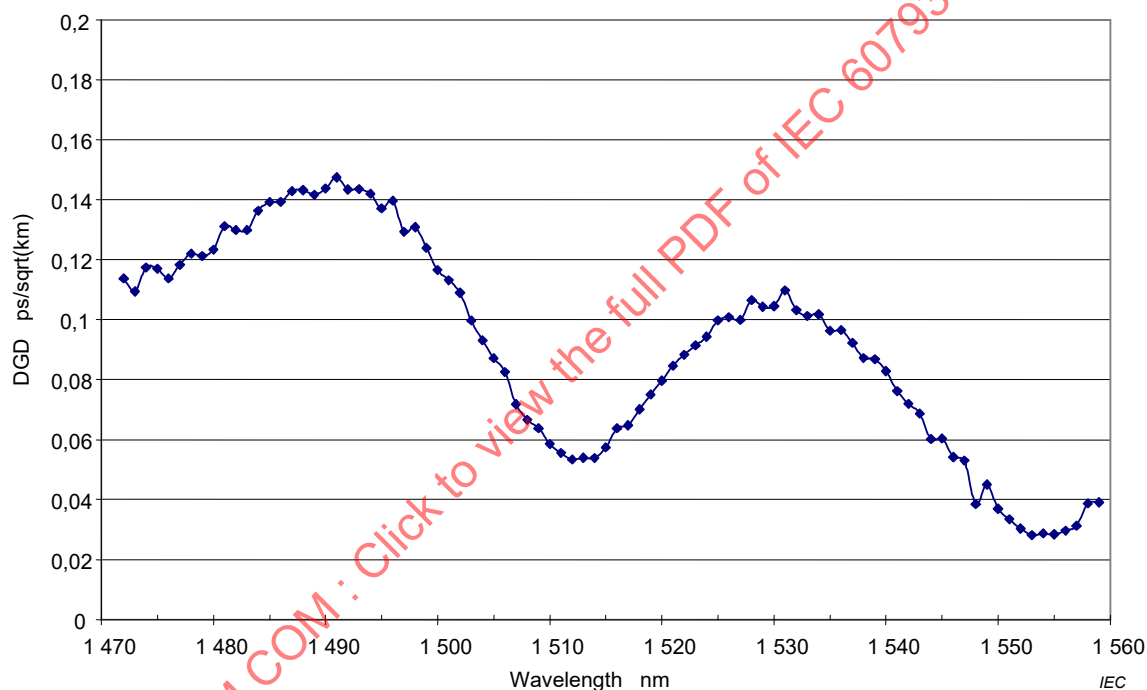
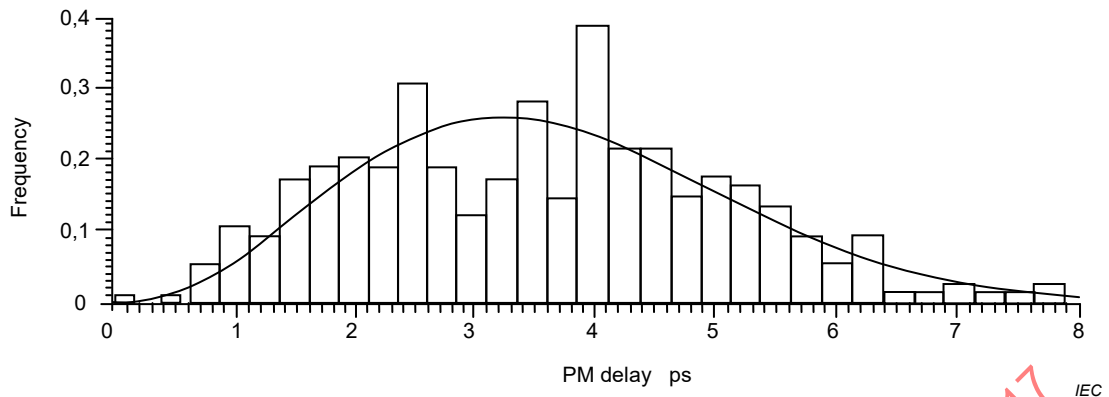


Figure B.2 – Typical random mode coupling results from method B



NOTE A Maxwell curve is superimposed on the histogram.

Figure B.3 – Typical histogram of DGD values.

The JME and PSA analysis approaches are mathematically equivalent for first order assumptions in the absence of polarization dependent loss (PDL).

B.3.2 Jones matrix eigenanalysis (JME)

For each frequency pair, indicated by frequencies, ω_0 and $\omega_0 + \Delta\omega$, the three output Stokes vectors for each frequency are converted to Jones vectors and a T matrix is calculated for each frequency using ratios of the elements of the Jones vectors. The following relationship is used to convert a normalized output Stokes vector noted generically as $\hat{s}$, to a Jones vector, noted generically as $\hat{j}$.

$$\hat{s} = \begin{bmatrix} \cos 2\theta \\ \sin 2\theta \cos \mu \\ \sin 2\theta \sin \mu \end{bmatrix} \Leftrightarrow \hat{j} = \begin{bmatrix} \cos \theta \exp(-i\mu/2) \\ \sin \theta \exp(i\mu/2) \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

where θ is the linear polarization parameter and μ is the circular parameter, which is also the phase separation of the x and y element of the Jones vector. The linear parameter can be assumed to be within the range 0 to π for this calculation.

For each frequency, the x and y elements of the Jones vectors are designated as: h_x , h_y , q_x , q_y , v_x , and v_y . Using these, calculate the following ratios:

$$k_1 = h_x / h_y \quad k_2 = v_x / v_y \quad k_3 = q_x / q_y \quad k_4 = \frac{k_3 - k_2}{k_1 - k_3} \quad (\text{B.4})$$

For each frequency, the Jones transfer matrix, T , is calculated as:

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

Using the T matrices for the frequency pair, the frequency transfer matrix, J , is calculated as:

$$J = T(\omega_0 + \Delta\omega) T^{-1}(\omega_0) \quad (\text{B.6})$$

The eigenvalues of J are calculated and designated as ρ_1 and ρ_2 . The DGD, $\Delta\tau$, is calculated as:

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

where Arg denotes the argument function, that is, $\arg(me^{i\theta}) = \theta$, $m \geq 0$ and $|\theta| < \pi$.

The JME mathematical formulation and detailed calculations are given in IEC TR 61282-9.

B.3.3 Poincaré sphere analysis (PSA)

For the PSA, matrix algebra is done on the normalized output Stokes vectors to deduce the rotation of the output Stokes vector with frequency.

For each frequency pair, indicated by frequencies, ω_0 and $\omega_0 + \Delta\omega$, the three measured output Stokes vectors for each frequency are converted as follows:

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

From the Stokes vectors $\hat{h}$, $\hat{v}$ and $\hat{q}$, form the vector products $\hat{c} = \hat{h} \times \hat{q}$ and $\hat{c}' = \hat{q} \times \hat{v}$ at each frequency.

For each frequency pair, compute the finite differences:

$$\begin{aligned} \Delta\hat{h} &= \hat{h}(\omega_0 + \Delta\omega) - \hat{h}(\omega_0) & \Delta\hat{q} &= \hat{q}(\omega_0 + \Delta\omega) - \hat{q}(\omega_0) & \Delta\hat{v} &= \hat{v}(\omega_0 + \Delta\omega) - \hat{v}(\omega_0) \\ \Delta\hat{c} &= \hat{c}(\omega_0 + \Delta\omega) - \hat{c}(\omega_0) & \Delta\hat{c}' &= \hat{c}'(\omega_0 + \Delta\omega) - \hat{c}'(\omega_0) \end{aligned} \quad (\text{B.9})$$

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

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

where $\Delta\hat{h}^2 = \Delta\hat{h} \bullet \Delta\hat{h}$

The PSA mathematical formulation and detailed calculations are given in IEC TR 61282-9.

B.3.4 State of polarization (SOP)

For the SOP analysis, the trace on the Poincaré sphere describing the evolution of the SOP with wavelength is reconstructed from the measured normalized output Stokes vectors. The trace is analysed piecewise, considering wavelength intervals (which may include more than two wavelength steps) such that the assumptions ensuring the existence of well-determined PSP's hold. The local PSP axis on the Poincaré sphere and the corresponding rotation angle $\Delta\theta$ caused by the considered wavelength variation $\delta\lambda$ are then determined by means of simple geometrical considerations.

A possible procedure could be the analysis of the trace on the Poincaré sphere by considering the measured points three by three and finding the point of intersection of the axes of the segments identified by the two pairs of points. Starting from this point, it is possible to calculate the value of $\Delta\theta$ by means of trigonometric relationships.

The DGD is found from the following expression:

$$\Delta\tau = \left| \frac{\Delta\theta}{\Delta\omega} \right| = \left| \frac{\Delta\theta}{2\pi c \cdot \delta\lambda} \lambda_i \lambda_f \right| \quad (\text{B.11})$$

where λ_i and λ_f are respectively the initial and the final wavelength of $\delta\lambda$.

The SOP mathematical formulation and detailed calculations are given in IEC TR 61282-9.

NOTE If the output Stokes vector is aligned with the true PSP at a given frequency, the calculated DGD at that frequency can be substantially less than the actual value.

Annex C (normative)

Requirements specific to method C (INTY) – Interferometry method

C.1 Apparatus

C.1.1 Block diagram

Figure C.1 shows a possible block diagram for. method C.

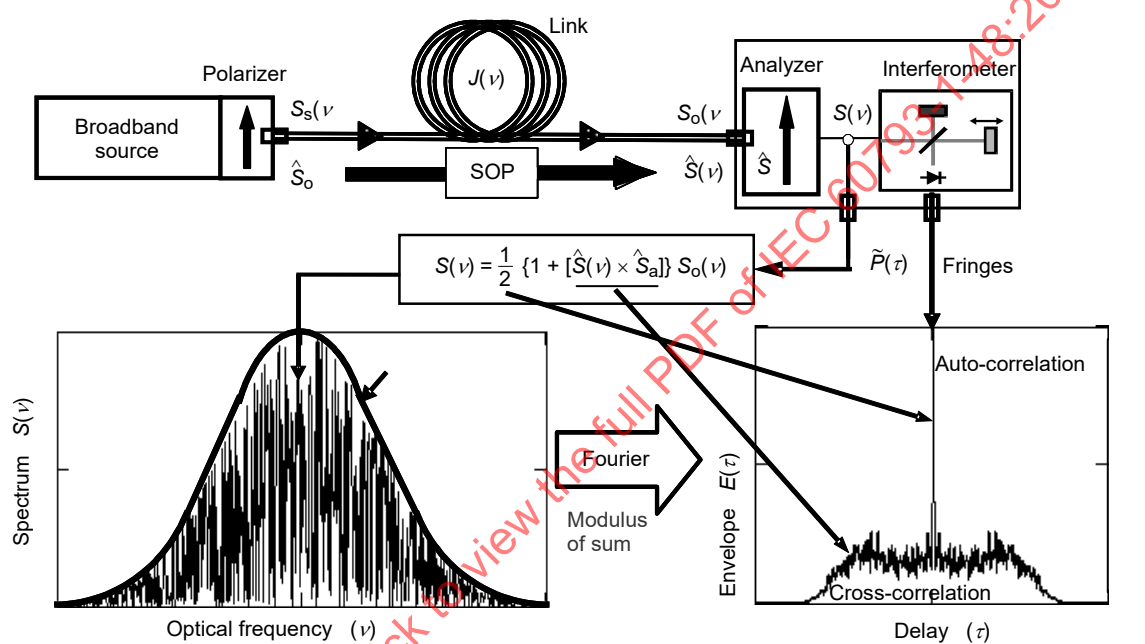


Figure C.1 – Schematic diagram for method C (generic implementation)

Parameters used in Figure C.1 and later throughout the text:

- ν optical frequency ($\lambda \nu = c$);
- τ difference of round-trip delay between the two arms of the interferometer;
- $S_s(\nu)$ optical spectrum, at FUT input $\equiv$ spectral density of $E_s(\nu)$, the source electric field spectrum;
- $S_o(\nu)$ optical spectrum, at FUT output (analyser input);
- $S(\nu)$ optical spectrum, at analyser output (interferometer input);
- $\hat{S}_0$ input SOP (at FUT input; a unit Stokes vector);
- $\hat{S}(\nu)$ output SOP (at FUT output);
- $\hat{S}_a$ analyser transmission axis;
- $\hat{S}(\nu) \bullet \hat{S}_a$ Stokes parameter giving the projection of $\hat{S}(\nu)$ on the analyser transmission axis. It is this parameter 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 $P(\tau)$ ("a.c." part);
P_0	constant part of $P(\tau)$ ("d.c." parts);
$E(\tau)$	Fringe envelope;
$E_x(\tau)$	cross-correlation envelope;
$E_0(\tau)$	autocorrelation envelope;

The optical power at the interferometer output, $P(\tau)$, is equal to the sum of "a.c." and "d.c." parts. Both parts are equal at $\tau = 0$ so the "a.c." part can be calculated. For an ideal interferometer, the "a.c." 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 analyser. For non-ideal interferometers, some corrections may be applied, depending on the details of the implementation.

For TINTY, the envelope of the interferogram, $E(\tau)$, is the absolute value of the "a.c." part. For GINTY, additional calculations to obtain the cross-correlation and autocorrelation envelopes are described in C.2.2.2 and C.3.2. These calculations involve two measured interferograms resulting from the analyser being set at two orthogonal SOPs.

Figure C.2 shows block diagrams for three specific implementations.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60793-1-48:2017

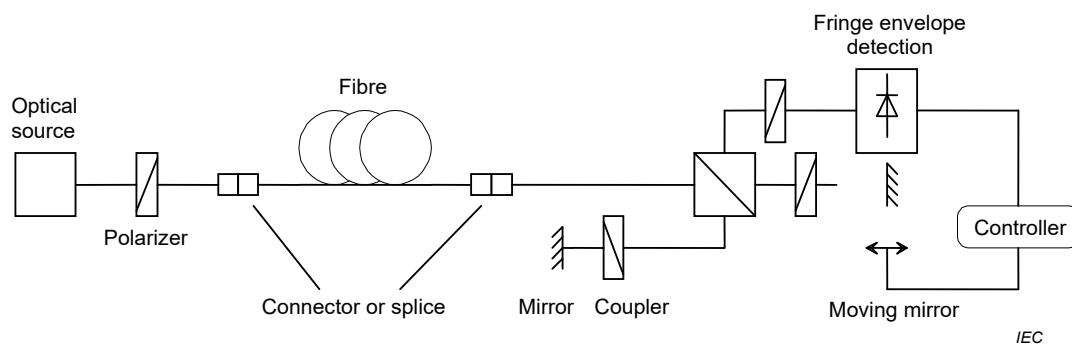


Figure C.2a – Michelson interferometer

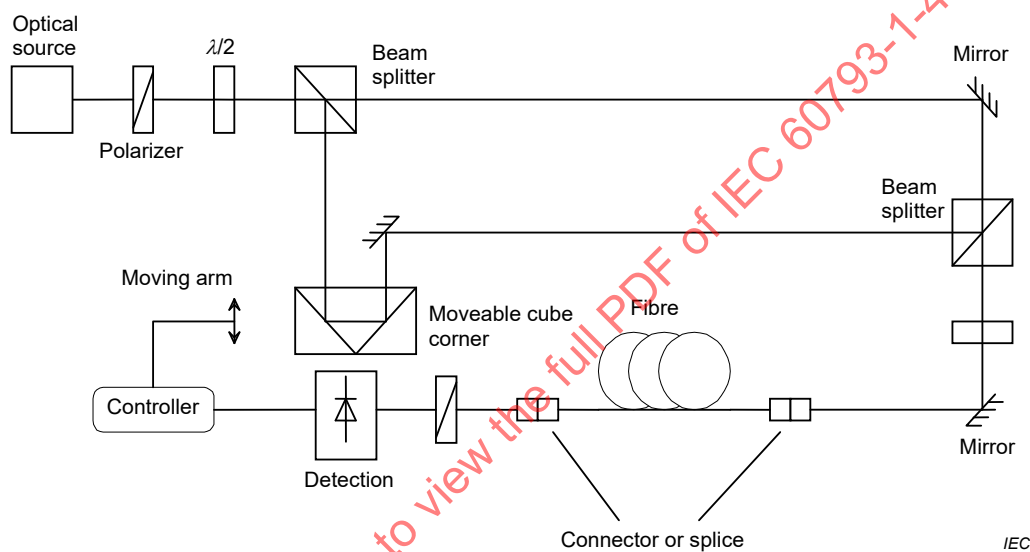
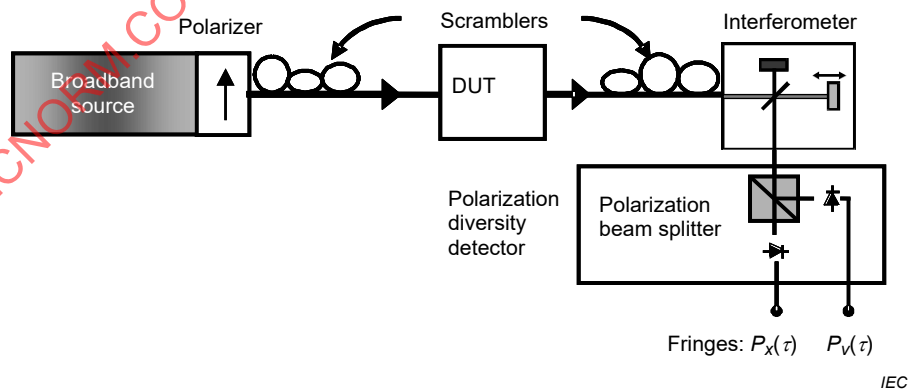


Figure C.2b – Mach-Zehnder interferometer



NOTE The optional input/output (I/O)-SOP scramblers are used to improve the measurement uncertainty (see IEC TR 61282-9)

Figure C.2c – Setup with polarization scramblers

Figure C.2 – Other schematic diagrams for method C

C.1.2 Light source

A BBS is used that emits radiation at the intended measurement wavelengths, such as a light emitting diode (LED), an amplified spontaneous emission (ASE) source or a superfluorescent source. The light shall be polarized as shown in Figure C.1. The central wavelength, λ_0 , shall be within the 1 310 nm or 1 550 nm windows or any other window of interest. In order to use a TINTY-based measurement system successfully, the BBS spectral shape shall be approximately Gaussian, without ripples that could influence the autocorrelation function of the emerging light. A GINTY-based measurement system does not require such source characteristics: any shape can be used. The spectral source line width (-3 dB), $\Delta\lambda$, shall be known to calculate the coherence time, t_c , which is determined with the following:

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

C.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 cube beam splitter.

C.1.4 Analyser

The analyser function shown in Figure C.1 may be implemented within the interferometer. For the TINTY approach, the analyser shall be capable of being rotated to a second setting that is orthogonal to the initial setting.

C.1.5 Interferometer

The interferometer can be an air type or a fibre type. It can be of Michelson or Mach-Zehnder types, and it can be located at the source or at the detector end of the fibre under test. In all cases, the interferometer shall be configured such that orthogonal SOPs can interfere. There are many ways to achieve this.

The first way is to put an analyser at the input of the interferometer, as depicted in Figure C.1. However, if no polarizer is placed at input and both arms of the interferometer have no effect on the SOPs, no cross-correlation interferogram representative of PMD is observed. If no polarizer is set at the interferometer input, something else shall be done.

Second, a wave plate in one interferometer arm may be used in case of an air-type interferometer. Generally, the roundtrip in the two interferometer arms of any dual-path interferometer can be represented by Jones matrices T_1 and T_2 . This is equivalent to a wave plate with Jones matrix $T = T_1 T_2^+$ in one arm only. In case of a fibre interferometer, a Lefebvre loop may be put in one arm, and adjusted until $T = T_1 T_2^+$ gives the desired effect (a given cross-correlation-to-autocorrelation ratio).

One particular case consists of putting a quarter wave plate in one arm of a Michelson interferometer (or a half wave plate in one arm of a Mach-Zehnder interferometer); with this configuration, only the cross-correlation interferogram is observed.

C.1.6 Polarization scrambler

In Figure C.2c, the polarization scrambler allows the selection of any SOPs for the FUT input and output. The polarization beamsplitter allows simultaneous detection of what would be detected by two orthogonal analyser settings. The functionality of the polarization scrambler selecting various SOPs for the input and various analyser settings at the output can be achieved by other means.

C.1.7 Polarization beam splitter

A polarization beam splitter (PBS) may be used as shown in Figure C.2c 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 may be used to obtain these interferograms from orthogonal output SOPs.

C.2 Procedure

C.2.1 Calibration

The equipment is calibrated by checking the mechanics of the delay line with a birefringent fibre of known PMD delay. Alternatively, an assembly of birefringent fibres of known characteristics may be measured. The environment and the launching fibre shall be stable during the measurement period.

C.2.2 Routine operation

C.2.2.1 General

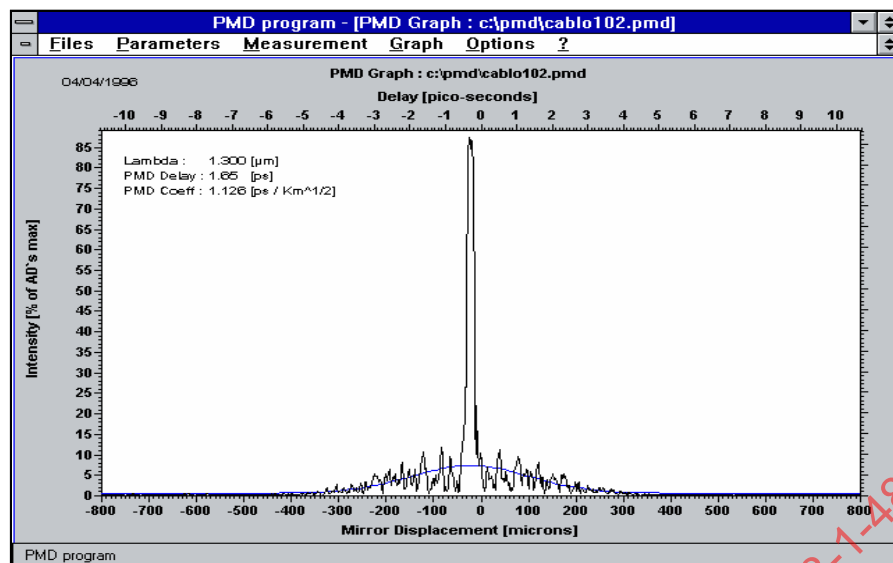
One end of the fibre under test is coupled to the polarized output of the polarized light source. The other end is coupled to the interferometer input. This can be done by standard fibre connectors, splices or by a fibre alignment system. If the latter is used, some index matching oil at the joints avoids reflections.

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 shall be almost identical.

C.2.2.2 Procedure for TINTY

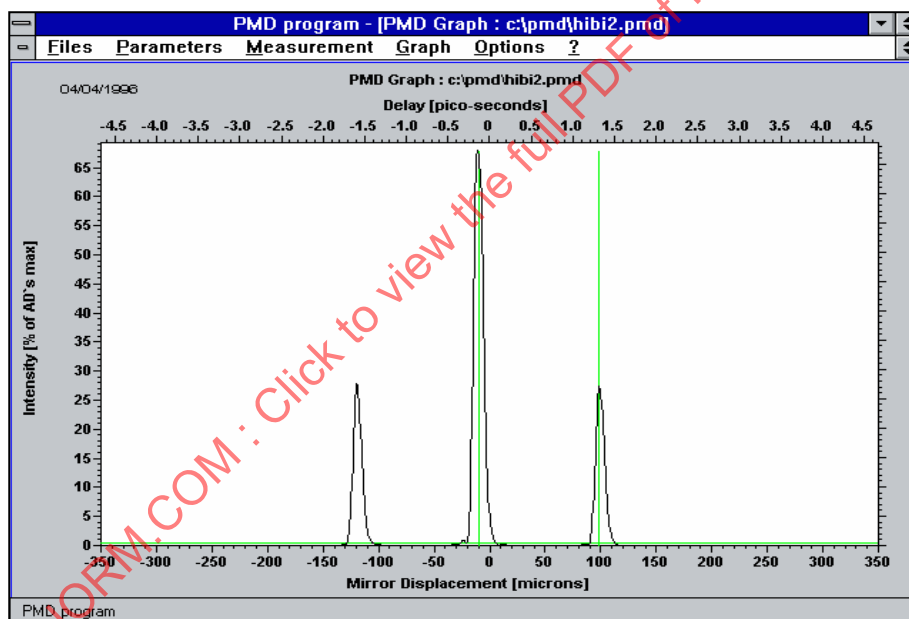
A first acquisition is made by moving the mirror of the interferometer arm and recording the intensity of the light. The fringe pattern, $\tilde{P}(\tau)$, is calculated by subtracting the “d.c.” part from the interferogram: $\tilde{P}(\tau) = P(\tau) - P_0$. The fringe envelopes that are generally displayed are the absolute value of the fringe pattern. Typical examples of fringe envelopes for negligible and random polarization mode coupling are shown in Figure C.3.

In case of insufficient polarization mode coupling, or in case of low PMD, it is recommended to repeat the measurement for different SOPs or to modulate the SOP during the measurement in order to obtain a result which is an average over all SOPs.



IEC

Figure C.3a – Random mode coupling using a TINTY-based measurement system with one I/O SOP



IEC

Figure C.3b – Negligible mode coupling using a TINTY-based measurement system with one I/O SOP

Figure C.3 – Fringe envelopes for negligible and random polarization mode coupling of TINTY-based measurement system

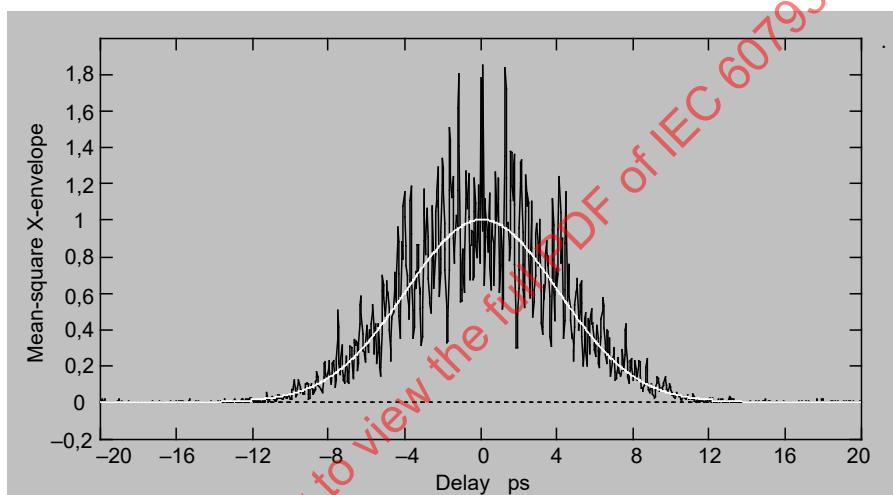
C.2.2.3 GINTY procedure

The combination of a particular input polarizer setting and an orthogonal pair of analyser settings is called an I/O SOP. Complete the scan(s) for the two interferograms, from the two orthogonal analyser settings and subtract the “d.c.” part from each to obtain $\tilde{P}_x(\tau)$ and $\tilde{P}_y(\tau)$, the orthogonally generated fringes.

The cross-correlation and autocorrelation fringe envelopes, $E_x(\tau)$ and $E_0(\tau)$, are calculated as:

$$E_x(\tau) = \left| \tilde{P}_x(\tau) - \tilde{P}_y(\tau) \right| \quad E_0(\tau) = \left| \tilde{P}_x(\tau) + \tilde{P}_y(\tau) \right| \quad (\text{C.2})$$

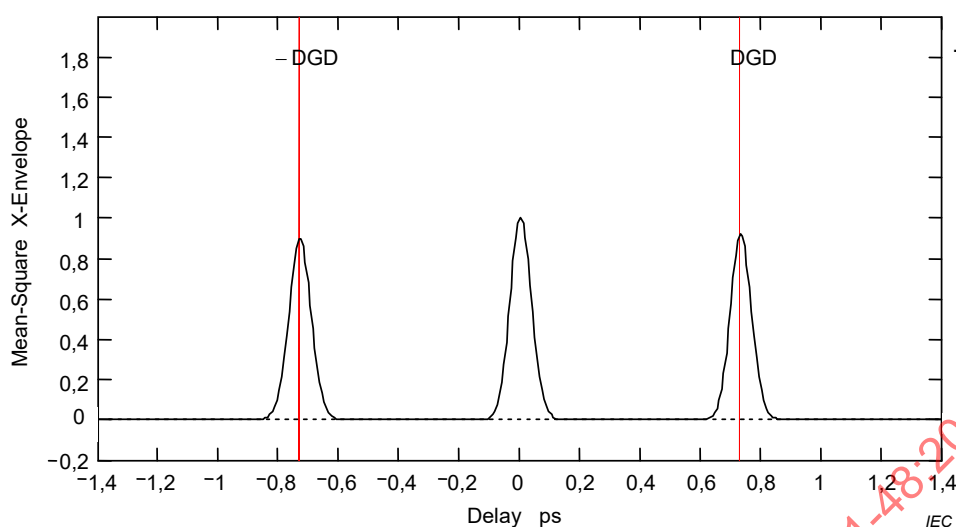
These functions are squared for the purposes of later calculations and display. Some example squared cross-correlation results are shown below. Note that the autocorrelation peak seen with the TINTY is not present.



IEC

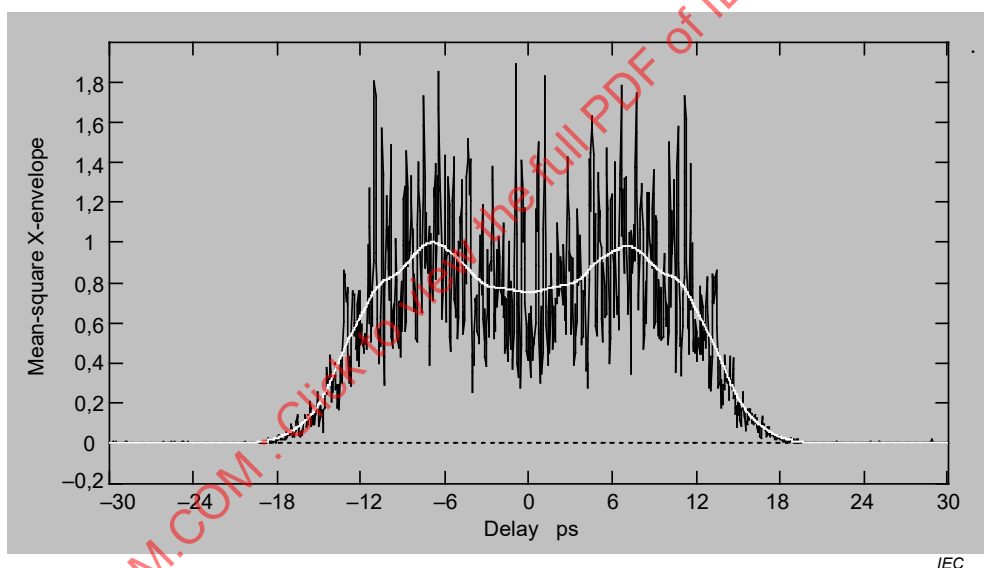
NOTE $LI_{\text{c}} = 100$ and $PMD/\sigma_A \sim 100$ (σ_A = r.m.s. width of the autocorrelation envelope); $PMD = 4, 94$ ps, $\sigma_A = 50$ fs; a nearly-Gaussian smoothed envelope; smoothing is for guiding the eye only: analysis is not performed on any kind of fit.

Figure C.4a – Random mode coupling using a GINTY-based measurement system with I/O-SOP scrambling



NOTE $L/I_c \ll 1$, $DGD = 0,732$ ps, $\sigma_A = 50$ fs, $DGD/\sigma_A \sim 14,7$

Figure C.4b – Negligible mode coupling using a GINTY-based measurement system with I/O-SOP scrambling



NOTE One random mode coupling section with $L/I_c = 10$ + one negligible mode coupling section with $DGD = PMD_{Random}/4$; $PMD = 9,97$ ps, $\sigma_A = 50$ fs with nearly-flat envelope.

Figure C.4c – Mixed mode coupling using a GINTY-based measurement system with I/O-SOP scrambling

Figure C.4 – Fringe envelopes for mixed, negligible and random polarization mode coupling of GINTY-based measurement system

Options for polarization scrambling follow. When multiple I/O SOPs are measured, index them with i for later calculations.

C.2.2.4 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 analyser-axes forming a right-angled trihedron, for each three input SOPs also forming a right-angled trihedron.

C.2.2.5 Random scrambling

Scan-to-scan scrambling: automatic/manual setting of the scramblers at each scan.

Continuous scrambling: 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: 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 a.c. part and the previously d.c. part of the interferogram.

C.3 Calculations

C.3.1 General

Both the TINTY and GINTY calculations (shown below) report PMD_{RMS} . For ideal random mode coupling when the interferogram is of an ideal Gaussian shape, this may be converted to PMD_{MEAN} using Equation (3).

C.3.2 TINTY calculations

In the case of negligible mode coupling, the PMD delay is determined in the same way for TINTY-based and GINTY-based measurement systems, from the separation of the two satellite coherence peaks each delayed from the centre by the DGD of the fibre under test as shown in Figure C.3b and Figure C.4b. For this case, the DGD is equivalent to the PMD delay.

$$\langle \Delta \tau \rangle = \frac{2\Delta L}{c_0} \quad (C.3)$$

where

ΔL is the moving path of the optical delay line between the two satellite coherence peaks;
 c_0 is the light velocity in free space.

The PMD coefficient is given by $\langle \Delta \tau \rangle / L$, where L is the fibre length in km.

The following calculations are suitable for the random mode coupling regime associated with long fibres/cables or links. The spread in the fringe envelope – discounting the centre peak – is characterised.

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

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

where

σ_ε is the RMS width of the cross-correlation envelope.

A detailed algorithm for the calculation of σ_ε from a measured fringe envelope is described in Clause D.2.

For certain assumptions given below, Equation (C.4) can be related to Equation (3) as:

$$\langle \Delta\tau^2 \rangle = \frac{3}{4} \langle \sigma_\varepsilon^2 \rangle \quad (\text{C.5})$$

Equation (C.5) is obtained from the theory given the following assumptions:

a) ideal random mode coupling;

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. Analysis of no or negligible mode coupling is possible.

b) a purely Gaussian source, with no ripples;

c) $PMD \gg \sigma_0$, where σ_0 is the RMS width of the auto-correlation envelope;

d) ergodic conditions.

Given that the source is Gaussian, the result shall be some form of weighted average of the DGD values. This weighting is not specified in TINTY, but is in GINTY. For this reason, this method is expected to give a different result for a given wavelength range and time than one of the methods that use a rectangular weighting (such as for example, the RTM). 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.3.3 GINTY calculations

GINTY allows some of the assumptions required for Equation (C.5) with TINTY to be removed [4]:

a) the assumption of ideal random mode coupling is not required;

b) the assumption of a Gaussian source is not required;

c) the assumption that the PMD is large compared to the width of the autocorrelation function is not required.

Form the mean squared cross-correlation and autocorrelation envelopes, $\overline{E}_x^2(\tau)$ and $\overline{E}_0^2(\tau)$ as:

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

where N is the number of I/O SOPs

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 D.3. The mathematical definitions of these widths are:

$$\sigma_x^2 = \frac{\int_{-\tau}^{\tau} \tau^2 \langle E_x^2(\tau) \rangle d\tau}{\int_{-\tau}^{\tau} \langle E_x^2(\tau) \rangle d\tau} \quad \sigma_0^2 = \frac{\int_{-\tau}^{\tau} \tau^2 \langle E_0^2(\tau) \rangle d\tau}{\int_{-\tau}^{\tau} \langle E_0^2(\tau) \rangle d\tau} \quad (\text{C.7})$$

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:

$$PMD_{\text{RMS}} = \sqrt{\left[\frac{3}{2} (\sigma_x^2 - \sigma_0^2) \right]} \quad (\text{C.8})$$

Equation (C.8) relates to Equation (3) as, from [4]:

$$\frac{\int \Delta\tau^2(\nu) S_0^2(\nu) d\nu}{\int S_0^2(\nu) d\nu} = \frac{3}{2} (\sigma_x^2 - \sigma_0^2) \quad (\text{C.9})$$

Using the ideal definitions of the RMS width terms from Equations (C.7), Equation (C.9) is exact for any DGD curve present at the time of measurement and any source spectral characteristics. The left side of Equation (C.9) is a spectrally weighted (by squared power) RMS calculation.

Using the assumption of ergodic conditions:

$$\langle \Delta\tau^2 \rangle = \left\langle \frac{\int \Delta\tau^2(\nu) S_0^2(\nu) d\nu}{\int S_0^2(\nu) d\nu} \right\rangle \quad (\text{C.10})$$

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60793-1-48:2017

Annex D (informative)

Determination of RMS width from a fringe envelope

D.1 Overview

This annex presents two methods for the determination of the RMS width from fringe envelopes. These methods are mainly used for the interferometric method of measuring PMD. Clause D.2 is for an envelope with the autocorrelation peak present and is suitable for the TINTY analysis. Clause D.3 is for envelopes without this peak and is suitable for the GINTY analysis.

D.2 RMS calculation for TINTY

Figure D.1 shows a fringe envelope with an autocorrelation peak in the centre.

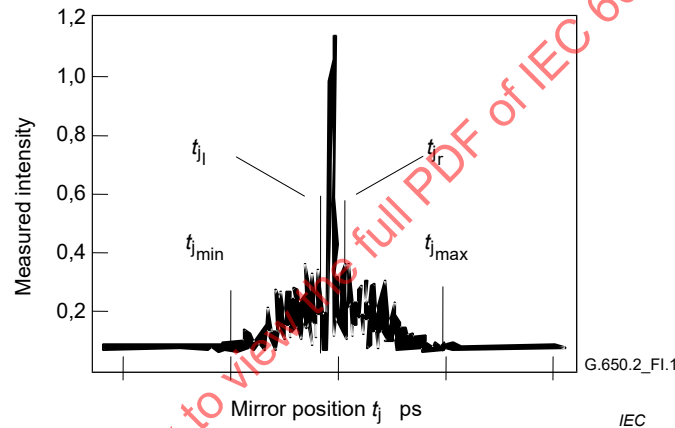


Figure D.1 – Parameters for interferogram analysis

Let $\tilde{I}_j$ denote the measured intensity of the fringe envelope at increasing positions t_j , $j = 1 \dots N$, with $[t_j] = \text{ps}$.

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

Definition: $N_5 = \text{round}(5 \cdot N/100)$

$$\tilde{I}_0 = \frac{\sum_{j=1}^{N_5} (\tilde{I}_j + \tilde{I}_{N-j})}{2N_5} \quad (\text{D.1})$$

$$X_2 = \frac{\sum_{j=1}^{N_5} (\tilde{I}_j^2 + \tilde{I}_{N-j}^2)}{2N_5} \quad (\text{D.2})$$

$$Na = \sqrt{X_2 - I_0^2} \quad (D.3)$$

Step 2 – Definition of the shifted intensity I_j

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

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

Step 3 – Computation of the centre C of the interferogram

$$C = \frac{\sum_{j=1}^N t_j I_j}{\sum_{j=1}^N I_j} \quad (D.6)$$

Step 4 – Removal of the central autocorrelation peak

Definition: j_l = the largest index j such that $C - t_j > \tau_c$ (D.7)

j_r = the smallest index j such that $t_j - C > \tau_c$ (D.8)

where τ_c is the source coherence time.

For cross-correlation interferograms, the following definition shall be applied:

$$j_r := j_l + 1 \quad (D.9)$$

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

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

Step 6 – Truncation of the interferogram

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

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

Step 7 – Computation of the second moment σ_ε of the truncated interferogram

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

Step 8 – Computation of the σ of the Gaussian $e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}}$ such that

$$\sigma_\varepsilon = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{\int_{t_{j_{\min}}}^{t_{j_l}} (t-C)^2 e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}} dt}{\int_{t_{j_{\min}}}^{t_{j_l}} e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}} dt}} + \sqrt{\frac{\int_{t_{j_r}}^{t_{j_{\max}}} (t-C)^2 e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}} dt}{\int_{t_{j_r}}^{t_{j_{\max}}} e^{-\frac{(t-C)^2}{2\sigma^2}} dt}} \right\} \quad (D.14)$$

Step 9 – Determination of $PMD_{RMS} \sqrt{\langle \Delta\tau^2 \rangle}$

$$PMD_{RMS} = \sqrt{\langle \Delta\tau^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3}{4}} \sigma \quad (D.15)$$

D.3 RMS calculation for GINTY

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 stabilise. For 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), (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 $\tilde{I}_0$

$$\tilde{I}_0 = \sum_{j \in T} \tilde{I}_j / N_T \quad (D.16)$$

Step 2 – Definition of the shifted intensity I_j

$$I_j = \tilde{I}_j - \tilde{I}_0 \quad \text{all } N \quad (\text{D.17})$$

Step 3 – Computation of the centre C of the interferogram

$$C = \frac{\sum_{j \in M} t_j I_j}{\sum_{j \in M} I_j} \quad (\text{D.18})$$

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

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{j \in M} (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j \in M} I_j} \quad (\text{D.19})$$

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 60793-1-48:2017

Bibliography

- [1] C.D. Poole and D.L. Favin, Polarization-mode dispersion measurements based on transmission spectra through an analyser, JLT, vol. 12, no. 6, p. 917, 1994
 - [2] R.C. Jones, A new calculus for the treatment of optical systems. VI. Experimental determination of the matrix, J. Optical Soc. Am., 37, p. 110-112, 1947
 - [3] N. Gisin, B. Gisin, J.P. Von der Weid, and R. Passy, How accurately one can measure a statistical quantity like polarisation-mode dispersion, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 8, No. 12, p. 1671-1673, 1996
 - [4] N. Cyr, Polarization-mode dispersion measurement: generalization of the interferometric method to any coupling regime, J. Lightwave Technol., Vol. 22, No. 3, p. 794- 805, 2004
 - [5] W. Press, W. Vetterling, S. Teukolsky and B. Flannery, Numerical Recipes in C, Cambridge University Press, p. 51, 1992
 - [6] L. Lawson, R. Hanson, Solving Least Squares Problems, Prentiss-Hall, p. 222-225, 1972
 - [7] IEC 60793-1-44, *Optical fibres - Part 1-44: Measurement methods and test procedures - Cut-off wavelength*
 - [8] IEC 60793-1-50, *Optical fibres - Part 1-50: Measurement methods and test procedures - Damp heat (steady state) tests*
 - [9] IEC 60793-2-50, *Optical fibres - Part 2-50: Product specifications - Sectional specification for class B single-mode fibres*
 - [10] IEC 60794-3, *Optical fibre cables - Part 3: Outdoor cables - Sectional specification*
 - [11] IEC 61280-4-4, *Fibre optic communication subsystem test procedures - Part 4-4: Cable plants and links - Polarization mode dispersion measurement for installed links*
 - [12] IEC 61290-11-1, *Optical amplifiers - Test methods - Part 11-1: Polarization mode dispersion parameter - Jones matrix eigenanalysis (JME)*
 - [13] IEC 61290-11-2, *Optical amplifiers - Test methods - Part 11-2: Polarization mode dispersion parameter - Poincaré sphere analysis method*
 - [14] 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*
 - [15] IEC TR 61282-3, *Fibre optic communication system design guides - Part 3: Calculation of link polarization mode dispersion*
 - [16] IEC TR 61282-9, *Fibre optic communication system design guides - Part 9: Guidance on polarization mode dispersion measurements and theory*
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	55
INTRODUCTION	57
1 Domaine d'application	58
2 Références normatives	58
3 Termes, définitions, symboles et termes abrégés	58
3.1 Termes et définitions	58
3.2 Symboles et abréviations	58
4 Généralités	61
4.1 Méthodes de mesure de la PMD	61
4.2 Méthode d'essai de référence	64
4.3 Applicabilité	64
5 Appareillage	64
5.1 Généralités	64
5.2 Source de rayonnement lumineux et polariseurs	65
5.3 Optique d'entrée	65
5.4 Positionneur d'entrée	65
5.5 Extracteur de mode de gaine	65
5.6 Filtre de mode d'ordre élevé	65
5.7 Positionneur de sortie	65
5.8 Optique de sortie	65
5.9 Détecteur	65
5.10 Calculateur	66
6 Echantillonnage et spécimens	66
6.1 Généralités	66
6.2 Longueur des spécimens	66
6.3 Déploiement	67
6.3.1 Généralités	67
6.3.2 Fibre non câblée	67
6.3.3 Câble à fibres optiques	67
7 Procédure	67
8 Calcul ou interprétation des résultats	68
9 Documentation	68
9.1 Informations exigées pour chaque mesure	68
9.2 Informations à mettre à disposition	68
10 Informations relatives à la spécification	68
Annexe A (normative) Exigences spécifiques à la méthode A (FA) – Méthode de mesure par analyseur fixe	69
A.1 Appareillage	69
A.1.1 Schémas fonctionnels	69
A.1.2 Source de rayonnement lumineux	69
A.1.3 Analyseur	70
A.2 Procédure	70
A.2.1 Plage de longueurs d'onde et incrément de longueur d'onde	70
A.2.2 Balayages	71
A.3 Calculs	73

A.3.1	Méthodes de calcul de la PMD.....	73
A.3.2	Comptage des extrêmes	73
A.3.3	Transformée de Fourier	73
A.3.4	Analyse de Fourier cosinus.....	76
Annexe B (normative) Exigences spécifiques à la méthode B (SPE) – Méthode d'évaluation des paramètres de Stokes		80
B.1	Appareillage.....	80
B.1.1	Schéma fonctionnel	80
B.1.2	Source de rayonnement lumineux.....	80
B.1.3	Polarimètre.....	81
B.2	Procédure	81
B.3	Calculs	82
B.3.1	Principe	82
B.3.2	Analyse des valeurs propres de la matrice de Jones (JME)	83
B.3.3	Analyse de la sphère de Poincaré (PSA)	84
B.3.4	Etat de polarisation (SOP)	85
Annexe C (normative) Exigences spécifiques relatives à la méthode C (INTY) – Méthode par interférométrie.....		86
C.1	Appareillage.....	86
C.1.1	Schéma fonctionnel	86
C.1.2	Source de rayonnement lumineux.....	89
C.1.3	Séparateur de faisceau.....	89
C.1.4	Analyseur	89
C.1.5	Interféromètre.....	89
C.1.6	Brouilleur de polarisation	90
C.1.7	Séparateur de faisceau par polarisation.....	90
C.2	Procédure	90
C.2.1	Etalonnage	90
C.2.2	Procédure d'essai.....	90
C.3	Calculs	95
C.3.1	Généralités.....	95
C.3.2	Calculs dans le cadre de la méthode TINTY	95
C.3.3	Calculs dans le cadre de la méthode GINTY.....	96
Annexe D (informative) Détermination de la largeur efficace à partir de l'enveloppe des franges		98
D.1	Vue d'ensemble	98
D.2	Calcul de la valeur efficace dans le cadre de la méthode TINTY	98
D.3	Calcul de la valeur efficace dans le cadre de la méthode GINTY.....	100
Bibliographie.....		102

Figure A.1 – Schémas fonctionnels relatifs à la méthode A	69
Figure A.2 – Résultats typiques de la méthode A	72
Figure A.3 – Dispersion de mode de polarisation (PMD) par analyse de Fourier	75
Figure A.4 – Fonctions d'intercorrélacion et d'autocorrélacion	79
Figure B.1 – Schéma fonctionnel pour la méthode B	80
Figure B.2 – Résultats typiques d'un couplage de mode aléatoire par la méthode B	82
Figure B.3 – Histogramme typique des valeurs du retard de groupe différentiel (DGD)	83
Figure C.1 – Schéma fonctionnel de la méthode C (mise en œuvre générique).....	86

Figure C.2 – Autres schémas fonctionnels pour la méthode C.....	88
Figure C.3 – Enveloppes de franges pour des couplages de mode de polarisation négligeable et aléatoire d'un système de mesure basé sur la méthode TINTY.....	92
Figure C.4 – Enveloppes de franges pour des couplages de mode mixte de polarisation négligeables et aléatoires d'un système de mesure basé sur la méthode GINTY.....	94
Figure D.1 – Paramètres concernant l'analyse de l'interférogramme	98
Tableau A.1 – Calculs par transformée cosinus	79

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60793-1-48:2017

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

FIBRES OPTIQUES –

**Partie 1-48: Méthodes de mesure et procédures d'essai –
Dispersion de mode de polarisation**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. 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 60793-1-48 a été établie par le sous-comité 86A: Fibres et câbles, du comité d'études 86 de l'IEC: Fibres optiques.

La présente troisième édition annule et remplace la deuxième édition publiée en 2007, dont elle constitue une révision technique. Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) suppression de l'approche par les états de polarisation (SOP).

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

CDV	Rapport de vote
86A/1678/CDV	86A/1766/RVC

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

La présente Norme internationale doit être lue conjointement avec l'IEC 60793-1-1:2008. Une liste de toutes les parties de la série IEC 60793, publiées sous le titre général *Fibres optiques*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication 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 à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée 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*) provoque l'élargissement d'une impulsion optique dans le domaine temporel. Cette dispersion pourrait détériorer les performances 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: *Differential Group Delay*), $\Delta\tau$, entre des paires d'états de polarisation principaux (PSP: *Principal States of Polarization*) polarisées 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 moyenne des valeurs du retard de groupe différentiel (DGD).

Pour de grandes longueurs de fibres, le retard de groupe différentiel varie de manière aléatoire tant dans le domaine temporel que dans le domaine des longueurs d'onde, dans la mesure où il dépend des détails de 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 en fonction du temps. Par conséquent, une façon utile de caractériser la dispersion de mode de polarisation (PMD) des fibres de grande longueur est de le faire avec la valeur moyenne du retard de groupe différentiel (DGD) sur une plage de fréquences optiques choisie de manière appropriée, à savoir, soit RMS $\langle\Delta\tau\rangle$, la valeur efficace du retard de groupe différentiel sur cette plage de fréquences, soit MEAN $\langle\Delta\tau\rangle$, la moyenne linéaire du retard de groupe différentiel sur cette plage de fréquences. En principe, la valeur moyenne du DGD (RMS $\langle\Delta\tau\rangle$ ou MEAN $\langle\Delta\tau\rangle$) 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 moyenne du DGD est un moyen de prévision utile des performances des systèmes d'ondes lumineuses.

Le terme "PMD" est utilisé à la fois dans un sens général désignant deux modes de polarisation ayant des vitesses de groupe différentes, et dans le sens spécifique de la valeur moyenne du DGD (RMS $\langle\Delta\tau\rangle$ ou MEAN $\langle\Delta\tau\rangle$). Bien que calculée de manière préférentielle sur la fréquence, la moyenne du retard de groupe différentiel $\Delta\tau$ ou de l'élargissement d'impulsion $\Delta\delta$ peut, dans certains cas, être calculée sur le temps ou sur la température.

La longueur de couplage l_c est la longueur de la fibre ou du câble sur laquelle un couplage significatif est observé entre les deux états de polarisation. Si la longueur de la fibre L satisfait à la condition $L \ll l_c$, le couplage des modes est négligeable et $\langle\Delta\tau\rangle$ est à l'échelle de la longueur de la fibre. Le coefficient de PMD correspondant est

$$\text{coefficient PMD de petite longueur} = \langle\Delta\tau\rangle/L.$$

Dans la pratique, les fibres sont presque toujours bien plus longues que la longueur de couplage et le couplage des modes est presque toujours aléatoire. Lorsque le couplage des modes est aléatoire, $\langle\Delta\tau\rangle$ est proportionnel à la racine carrée de la longueur de la fibre, et

$$\text{coefficient PMD de grande longueur} = \langle\Delta\tau\rangle/\sqrt{L}$$

FIBRES OPTIQUES –

Partie 1-48: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Dispersion de mode de polarisation

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60793 s'applique aux trois méthodes de mesure de la dispersion de mode de polarisation (PMD), qui sont décrites à l'Article 4. Elle établit des exigences uniformes pour mesurer la PMD d'une fibre optique unimodale, de façon à aider à contrôler les fibres et les câbles à des fins commerciales.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60793-1-1, *Optical fibres - Part 1-1: Measurement methods and test procedures - General and guidance* (disponible en anglais seulement)

IEC TR 61292-5, *Optical amplifiers - Part 5: Polarization mode dispersion parameter - General information* (disponible en anglais seulement)

Recommandation UIT-T G.650.2, *Définitions et méthodes de test applicables aux attributs se rapportant aux caractéristiques statistiques et non linéaires des fibres et câbles optiques monomodes*

3 Termes, définitions, symboles et termes abrégés

3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et les définitions de la Recommandation UIT-T G.650.2 s'appliquent.

NOTE De plus amples explications sur leur utilisation dans le présent document sont fournies par l'IEC TR 61282-9.

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 abréviations

Arg	Fonction argument
ASE	Amplified Spontaneous Emission (émission spontanée amplifiée)
BBS	BroadBand Source (source à large bande)
CFT	Cosine Fourier Transform (transformée de Fourier cosinus)
c/c_0	Vitesse du rayonnement lumineux dans le vide/en espace libre
DGD	Differential Group Delay (retard de groupe différentiel)
$DGD_{\max}$	Valeur du DGD maximale

DOP	Degree Of Polarization (degré de polarisation)
E	Nombre d'extrêmes dans $R(\lambda)$ (méthode A)
EC	Extrema Counting (comptage des extrêmes)
$f(\Delta\tau)$	Distribution de probabilité de Maxwell
FA	Fixed Analyser (analyseur fixe) (méthode A)
FCFT	Fast Cosine Fourier Transform (transformée de Fourier cosinus rapide)
FT	Fourier Transform (transformée de Fourier)
FUT	Fibre Under Test (fibre en essai)
GINTY	Analyse générale pour la méthode C
INTY	Méthode par interférométrie (méthode C)
E/S	Entrée-Sortie
JME	Jones Matrix Eigenanalysis (analyse des valeurs propres de la matrice de Jones) (méthode B)
k	Facteur de couplage de mode
l_c	Longueur de couplage
L	Longueur de l'échantillon de fibre/câble en essai
LED	Light Emitting Diode (diode électroluminescente)
N	Nombre total d'intervalles de mesures/de population de fibres en couplage de mode/d'intervalles de longueurs d'onde
$P_A(\lambda)$	Puissance optique enregistrée avec l'analyseur en place (méthode A)
P_F	Probabilité de dépassement du $DGD_{\max}$
$P_B(\lambda)$	Puissance optique enregistrée avec l'analyseur ayant subi une rotation à 90° (méthode A)
$P_{TOT}(\lambda)$	Puissance optique enregistrée sans analyseur (méthode A)
$P_x(\tau)/P_x(\tau)$	Puissance reçue des deux axes d'états de polarisation (SOP) orthogonaux, correspondant aux franges de la méthode C
PBS	Polarization Beam Splitter (séparateur de faisceau par polarisation)
PDL	Polarization Dependent Loss (perte dépendant de la polarisation)
PDV	Polarization Dispersion Vector (vecteur de dispersion de la polarisation)
PMD	Polarization Mode Dispersion (dispersion de mode de polarisation)
PMD_Q	Valeur de la PMD de la liaison
PSA	Poincaré Sphere Analysis (analyse de la sphère de Poincaré) (méthode B)
PSP	Principle States of Polarization (principaux états de polarisation)
$R(\lambda)$	Rapport de sortie obtenu à partir du système de mesure de PMD (méthode A)
RBW	Resolution BandWidth (largeur de bande de résolution)
RTM	Reference Test Method (méthode d'essai de référence)
s	Vecteurs de Stokes en sortie normalisés
SOP	State Of Polarization (état de polarisation)
SPE	Stokes Parameter Evaluation (évaluation des paramètres de Stokes) (méthode B)
T	Matrice de Jones
T^{-1}	Inverse de la matrice de Jones
t_c	Temps de cohérence de la source optique (méthode C)
TINTY	Analyse traditionnelle pour la méthode C

α	Paramètre unique qui spécifie une distribution de Maxwell
X^2	Variable khi carré
$\Delta \hat{h} / \Delta \hat{v} / \Delta \hat{q} / \Delta \hat{c}$	Différences finies calculées à partir des vecteurs de Stokes
$\delta \lambda$	Taille d'échelon de longueur d'onde
$\Delta \lambda$	Largeur spectrale de la source optique (largeur à mi-hauteur [FWHM] sauf indication contraire)
$\delta \nu$	Taille d'échelon de fréquence optique
$\Delta \theta$	Angle de rotation sur la sphère de Poincaré
$\delta \tau$	Temps d'arrivée des différentes composantes de polarisation de l'élargissement d'un signal ou d'une impulsion
$\Delta \delta \tau_{\max}$	Valeur $\delta \tau$ maximale qui peut être mesurée
$\Delta \delta \tau_{\min}$	Valeur $\delta \tau$ minimale qui peut être mesurée
$\Delta \tau$	Valeur de retard de groupe différentiel
$\Delta \tau_{\max}$	DGD maximal
$\langle \Delta \tau \rangle$	DGD moyen sur la plage de balayage de longueurs d'onde ou valeur de PMD
$\sqrt{\langle \Delta \tau^2 \rangle}$	Valeur efficace du DGD sur la plage de balayage de longueurs d'onde ou valeur de PMD (méthode C)
$\langle \Delta \tau \rangle_0$	Spécification de PMD maximale que chaque fibre doit satisfaire dans une population de fibres à couplage de mode
$\langle \Delta \tau \rangle_t$	DGD moyen en fonction du temps
$\langle \Delta \tau \rangle_T$	DGD moyen en fonction de la température
$\langle \Delta \tau \rangle_\lambda$	DGD moyen en fonction de la longueur d'onde
$\Delta \omega$	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 de rayonnement lumineux
λ_1 / λ_2	Première/dernière longueur d'onde dans le jeu de longueurs d'onde d'essai (ou position de premier/dernier maximum ou minimum dans $R(\lambda)$ dans la méthode A)
ν	Fréquence optique du rayonnement lumineux
ρ_1 / ρ_2	Valeurs propres complexes de $T(\omega + \Delta \omega) T^{-1}(\omega)$
σ	Incertitude d'un écart-type
σ_0	Largeur en valeur efficace de l'enveloppe de l'interférogramme d'autocorrélation, au carré (méthode C, GINTY)
σ_A	Largeur en valeur efficace de l'enveloppe d'autocorrélation (méthode C)
σ_R	Moment d'ordre deux des données de la transformée de Fourier (méthode A)
σ_x	Largeur en valeur efficace de l'enveloppe de l'interférogramme d'intercorrélacion, au carré (méthode C, GINTY)
σ_ε	Largeur en valeur efficace de l'enveloppe d'intercorrélacion (méthode C, TINTY)
ω	Fréquence optique angulaire
Ω	Vecteur de dispersion de la polarisation

4 Généralités

4.1 Méthodes de mesure de la PMD

Trois méthodes sont décrites pour mesurer la PMD (se reporter aux Annexes A, B et C pour plus de détails). Les méthodes sont indiquées ci-dessous dans leur ordre de présentation. Pour certaines méthodes, plusieurs approches sont également proposées pour analyser les résultats mesurés.

a) Méthode A

- 1) Analyseur fixe (FA)
- 2) Comptage des extrêmes (EC)
- 3) Transformée de Fourier (FT)
- 4) Transformée de Fourier cosinus (CFT)

b) Méthode B

- 1) Evaluation des paramètres de Stokes (SPE)
- 2) Analyse des valeurs propres de la matrice de Jones (JME)
- 3) Analyse de la sphère de Poincaré (PSA)

c) Méthode C

- 1) Interférométrie (INTY)
- 2) Analyse traditionnelle (TINTY)
- 3) Analyse générale (GINTY)

La valeur de la PMD est définie par le retard de groupe différentiel (DGD), $\Delta\tau$, qui varie normalement de façon aléatoire avec la longueur d'onde, et qui est indiquée sous forme de métrique statistique. L'Equation (1) est une valeur moyenne linéaire des valeurs de DGD et elle est utilisée pour la spécification de câbles à fibres optiques. L'Equation (2) est la valeur efficace qui est indiquée par certaines méthodes. L'Equation (3) peut être utilisée pour convertir une valeur en une autre si, par hypothèse, les valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) suivent une distribution aléatoire de Maxwell.

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

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

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

L'Equation (3) ne s'applique que lorsque la distribution des DGD est de type Maxwell, par exemple lorsque la fibre est couplée en mode aléatoire. L'usage généralisé de l'Equation (3) peut être vérifié par analyse statistique. Les cas rencontrés peuvent ne pas correspondre à une distribution de Maxwell s'il existe des sources ponctuelles de biréfringence élevée (par rapport au reste de la fibre), telles que des courbures serrées, ou d'autres phénomènes qui réduisent le couplage de mode, tels que des rayons de courbure systématiquement réduits, avec la fibre tendue. Dans ces cas, la distribution des DGD commencera à ressembler à la valeur efficace d'une distribution en Khi-carré non centrée, avec trois degrés de liberté. Dans ces cas, la valeur de PMD_{RMS} sera généralement plus grande que la PMD_{MEAN} donnée par l'Equation (3). Les méthodes du domaine temporel telles que la méthode C et la méthode A, la transformée de Fourier cosinus, qui sont basées sur la PMD_{RMS} , peuvent utiliser l'Equation (3) pour convertir la PMD_{MEAN} . Si le couplage de mode est réduit, la valeur de PMD indiquée

résultante obtenue à partir de ces méthodes peut dépasser celle qui peut être indiquée par les mesures dans le domaine fréquentiel qui donnent PMD_{MEAN} , telles que la méthode B.

Le coefficient de PMD est la valeur de PMD normalisée à la longueur de la fibre. Pour une fibre de transmission normale, pour laquelle le couplage de mode aléatoire se produit, et pour laquelle les DGD sont distribuées comme des variables aléatoires de Maxwell, la valeur de PMD est divisée par la racine carrée de la longueur, et le coefficient de PMD est indiqué en $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$. Pour certaines fibres avec un couplage de mode négligeable, comme une fibre de maintien de la polarisation, la valeur de PMD est divisée par la longueur et le coefficient de PMD est indiqué en ps/km .

Toutes ces méthodes sont appropriées pour des mesures en laboratoire sur des longueurs de fabrication (d'usine) de fibres optiques et de câbles à fibres optiques. Pour toutes ces méthodes, des modifications dans le déploiement du spécimen peuvent fausser les résultats. Pour les câbles à fibres optiques déjà installés pouvant bouger ou vibrer, la méthode C ou la méthode B convient (dans une mise en œuvre capable de mesures dans une échelle de temps à la milliseconde).

Toutes ces méthodes exigent des sources de rayonnement lumineux contrôlées au niveau d'un ou de plusieurs états de polarisation (SOP). Toutes ces méthodes exigent l'injection du rayonnement lumineux dans un domaine spectral large (c'est-à-dire ayant une largeur comprise entre 50 nm et 200 nm) afin d'obtenir une valeur de PMD qui soit caractéristique du domaine (c'est-à-dire 1 300 nm ou 1 550 nm). Les méthodes diffèrent sur les points suivants:

- a) les caractéristiques de la longueur d'onde de la source;
- b) les caractéristiques physiques réellement mesurées;
- c) les méthodes d'analyse.

La méthode A mesure la PMD en mesurant une réponse à une variation de rayonnement lumineux à bande étroite dans une certaine plage de longueurs d'onde. Au niveau de la source, le rayonnement lumineux est polarisé linéairement pour un ou plusieurs états de polarisation (SOP). Pour chaque état de polarisation (SOP), la variation de la puissance de sortie filtrée à travers un analyseur de polarisation fixe, par rapport à la puissance détectée sans l'analyseur, est mesurée en fonction de la longueur d'onde. La fonction mesurée résultante peut être analysée de trois manières:

- a) en comptant le nombre de crêtes et de creux (comptage des extrêmes) de la courbe et en appliquant une formule indiquée [1]¹ pour être en accord avec la moyenne des valeurs du retard de groupe différentiel (DGD), quand les valeurs du DGD sont distribuées selon une distribution de Maxwell. Cette analyse est considérée comme une approche dans le domaine fréquentiel;
- b) en prenant la transformée de Fourier (FT) de la fonction mesurée. Cette FT équivaut à l'élargissement d'impulsion obtenu par la transmission à large bande de la méthode C. Une caractérisation appropriée de la largeur de la fonction FT est en accord avec les valeurs moyennes du DGD, quand les valeurs du DGD sont distribuées selon une distribution de Maxwell;
- c) en utilisant la transformée de Fourier cosinus (CFT) de la différence de spectres normalisés obtenus en plaçant l'analyseur en deux positions orthogonales, et en calculant la valeur efficace de l'enveloppe élevée au carré. La valeur PMD_{RMS} est indiquée. Cela est équivalent à simuler le motif de franges de la fonction d'intercorrélation qui résulterait de mesures d'interférométries.

La méthode B mesure $\Delta\tau(\omega)$ c'est à dire une réponse à une variation d'un rayonnement lumineux à bande étroite dans une certaine plage de longueurs d'onde. Au niveau de la source, le rayonnement lumineux est polarisé linéairement pour un ou plusieurs états de polarisation (SOP). Le vecteur de Stokes du rayonnement lumineux en sortie est mesuré pour

1 Les nombres entre crochets font référence à la Bibliographie

chaque longueur d'onde. La variation de ces vecteurs de Stokes en fonction de la fréquence optique angulaire, ω , et en fonction de la variation (éventuelle) de l'état de polarisation d'entrée permet d'obtenir le retard de groupe différentiel (DGD) en fonction de la longueur d'onde, par le biais de relations fondées sur les définitions suivantes:

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

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

où

s est le vecteur de Stokes normalisé en sortie;

Ω est le vecteur de dispersion de polarisation (PDV) dans la direction des PSP;

$\Delta\tau$ est le retard de groupe différentiel (DGD).

Pour les deux méthodes d'analyse des valeurs propres de la Matrice de Jones (JME) et de la sphère de Poincaré (PSA), trois états de polarisation (SOP) linéaires positionnés de façon nominale à 0°, 45° et 90° (orthogonaux sur la sphère de Poincaré), doivent être injectés pour chaque longueur d'onde.

La méthode 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 en utilisant les valeurs propres du résultat pour calculer le DGD, grâce à une formule d'argument à la fréquence de base.

La méthode PSA est appliquée en effectuant un calcul algébrique matriciel sur les vecteurs de Stokes en sortie normalisés pour déduire la rotation du vecteur de Stokes en sortie sur la sphère de Poincaré à deux longueurs d'onde voisines, en appliquant une formule en arc sinus pour obtenir le DGD. Les méthodes JME et PSA sont mathématiquement équivalentes pour des hypothèses communes (se reporter à l'IEC/TR 61282-9).

La méthode C est basée sur une source de rayonnement lumineux à large bande, polarisée linéairement. L'intercorrélation du champ électromagnétique émergent est déterminée par le diagramme d'interférence du rayonnement lumineux en sortie, c'est-à-dire l'interférogramme. La détermination du retard de PMD pour la plage de longueurs d'onde associée au spectre de la source est fondée sur l'enveloppe du diagramme de franges de l'interférogramme. Deux analyses sont possibles pour obtenir le retard de PMD (se reporter à l'IEC TR 61282-9), les deux mesurant la valeur PMD_{RMS} :

- a) TINTY utilise un ensemble de conditions de fonctionnement spécifiques pour sa mise en œuvre avec succès et une configuration fondamentale;
- b) GINTY n'a pas de conditions de fonctionnement limitatives, mais, en plus de la même configuration fondamentale que TINTY, utilise une configuration modifiée.

Les approches d'analyse représentent une évolution de la compréhension de la PMD. La méthode GINTY est, par exemple, plus complète que la méthode TINTY. La reproductibilité de la PMD dépend du niveau de PMD et de la plage de longueurs d'onde de la mesure [3]. Une reproductibilité relativement meilleure est obtenue pour des plages de longueurs d'onde plus larges et des valeurs de PMD plus élevées pour une plage donnée. Pour des mesures de valeurs de PMD plus élevées, par exemple 0,5 ps, les différences entre les méthodes d'analyses sont moins importantes que pour les mesures de valeurs de PMD faibles.

Des informations communes aux méthodes A, B et C sont fournies aux Articles 4 à 10, et des exigences relatives à chaque méthode individuelle figurent respectivement dans les Annexes A, B et C. L'IEC TR 61282-9 fournit des formules mathématiques pour toutes les méthodes.

4.2 Méthode d'essai de référence

La méthode B est la méthode d'essai de référence (RTM) qui doit être utilisée pour régler les litiges.

4.3 Applicabilité

La PMD dans une fibre est un paramètre statistique. L'IEC 60794-3 contient une exigence statistique sur la PMD, appelée PMD_Q , ou valeur de conception de la liaison, qui est fondée sur des mesures échantillonnées effectuées sur un câble à fibres optiques et sur des calculs relatifs à des liaisons mises bout à bout. La PMD d'une fibre câblée peut varier de la PMD d'une fibre non câblée en raison des effets liés à la construction et au processus de fabrication des câbles. Une limite de la PMD_Q sur la fibre non câblée est cependant exigée afin de limiter la PMD_Q sur les fibres câblées. La PMD_Q d'une fibre non câblée inférieure à la moitié de la limite de la PMD_Q d'une fibre câblée est généralement considérée comme une règle prudente. Des valeurs limites alternatives peuvent être déterminées pour des constructions particulières et des processus de fabrication de câbles stables.

Il convient de choisir le déploiement de la fibre ou du câble de manière à réduire le plus possible tout couplage de mode induit de l'extérieur. Les sources d'un tel couplage de mode extérieur peuvent être:

- a) une tension excessive;
- b) une courbure excessive induite par
 - 1) des entrecroisements des fibres sur un touret de transport;
 - 2) un écrasement de fibres dans un câble sur une bobine de trop petite taille;
 - 3) un rayon de courbure trop petit;
- c) une torsion excessive.

Il convient d'évaluer la reproductibilité des mesures individuelles après avoir soumis la fibre à des perturbations pour permettre un échantillonnage de toute la plage de combinaisons de couplages de modes. Pour cela, il est par exemple possible de faire varier légèrement la température ou d'effectuer des petits ajustements dans le déploiement. Gisin [3] a fait état d'une limite de reproductibilité fondamentale relative des mesures, et a montré que la reproductibilité relative s'améliore lorsque la PMD augmente et lorsque la largeur spectrale de la source augmente. Si les mesures de PMD sont combinées pour évaluer la spécification statistique d'un câble à fibres optiques (se reporter à l'IEC 60794-3), cette variabilité donne une possible exagération de la valeur de conception de la liaison.

L'IEC TR 61282-3 contient des lignes directrices relatives au calcul de la PMD pour des systèmes comprenant d'autres composants tels que des compensateurs de dispersion ou des amplificateurs optiques. L'IEC 61290-11-1 et l'IEC 61290-11-2 contiennent des méthodes d'essais pour des amplificateurs optiques, et l'IEC TR 61292-5 contient d'autres guides de conception. L'IEC 61280-4-4 contient des méthodes d'essais des liaisons y compris celles qui sont amplifiées. L'IEC 61300-3-32 contient des méthodes d'essai relatives aux composants optiques. L'IEC TR 61282-9 contient des informations générales sur la PMD, des formulations mathématiques relatives à la mise en œuvre des présentes méthodes et des considérations liées à la théorie de l'échantillonnage relative à l'utilisation de différentes sources de rayonnement lumineux et différents systèmes de détection.

5 Appareillage

5.1 Généralités

L'appareillage suivant est commun aux trois méthodes de mesure. Les Annexes A, B et C contiennent des dessins ainsi que d'autres exigences relatives aux équipements utilisés dans chacune des trois méthodes, respectivement.

5.2 Source de rayonnement lumineux et polariseurs

Se reporter aux Annexes A, B et C pour les choix détaillés des caractéristiques spectrales de la source de rayonnement lumineux. 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. L'IEC TR 61282-9 fournit des guides supplémentaires concernant l'état de polarisation (SOP) de l'entrée source, le degré de polarisation (DOP), l'utilisation de polariseurs et de contrôleurs de polarisation.

5.3 Optique d'entrée

Un système de lentilles optiques ou une fibre amorce peut être utilisé pour exciter le spécimen. Il est recommandé que la puissance couplée au spécimen soit relativement insensible à la position de son extrémité d'entrée. Pour cela, un faisceau d'injection qui sature spatialement et angulairement l'extrémité d'entrée de la fibre peut être utilisé.

Si une épissure en bout est utilisée, utiliser une substance adaptatrice d'indice entre la fibre amorce et le spécimen afin d'éviter les phénomènes d'interférence. La puissance couplée à la fibre doit être stable pendant toute la durée de la mesure.

5.4 Positionneur d'entrée

Prévoir des moyens permettant de positionner l'extrémité d'entrée du spécimen par rapport à la source de rayonnement lumineux. Des exemples incluent l'utilisation d'étages de micropositionneur à trois axes (x-y-z) ou de dispositifs de couplage mécanique tels que des connecteurs, des épissures sous vide ou des épissures à trois tiges, etc. La position de la fibre doit rester stable pendant toute la durée de la mesure.

5.5 Extracteur de mode de gaine

Utiliser un dispositif qui extrait les modes de gaine. Dans certaines conditions, le revêtement de la fibre remplira cette fonction.

5.6 Filtre de mode d'ordre élevé

Utiliser un moyen permettant d'éliminer des modes de propagation d'ordre élevé dans la plage de longueurs d'onde souhaitée, qui est supérieure ou égale à la longueur d'onde de coupure du spécimen (se reporter à l'IEC 60793-1-44). Par exemple, une boucle d'un rayon de 30 mm sur la fibre suffit généralement.

5.7 Positionneur de sortie

Prévoir un moyen adapté pour aligner l'extrémité de sortie de la fibre par rapport à l'optique de sortie. Un tel couplage peut inclure l'utilisation de lentilles ou il peut s'agir d'un connecteur mécanique couplé à une fibre amorce de détecteur.

Prévoir un moyen tel qu'un microscope à vision latérale ou une caméra munie d'un réticule pour placer la fibre à une distance fixe par rapport à l'optique de sortie. Cela peut suffire à assurer seulement un ajustement longitudinal si la fibre est maintenue dans le plan latéral par un dispositif tel qu'une plaquette à vide.

5.8 Optique de sortie

Se reporter l'Annexe A, B ou C, selon le cas.

5.9 Détecteur

Pour la détection des signaux, un détecteur optique linéaire et stable est utilisé sur la plage des intensités et des durées de mesure rencontrées en effectuant la mesure. Un système type pourrait être constitué d'une détection synchrone par un amplificateur verrouillé à

découpage, un appareil de mesure de puissance optique, un analyseur de spectre optique ou un polarimètre. Pour utiliser l'ensemble de la plage spectrale de la source, le système de détection doit avoir une plage de longueurs d'onde qui couvre les longueurs d'onde produites par la source de rayonnement lumineux. Pour plus de détails, se reporter à l'Annexe A, B ou C, selon le cas.

5.10 Calculateur

Utiliser un calculateur 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.

6 Echantillonnage et spécimens

6.1 Généralités

Un spécimen est constitué d'une longueur de fibre optique unimodale connue (IEC 60793-2-50) qui peut être câblée ou non. L'échantillon et les fibres amorcees doivent être fixés en position à une température nominale constante pendant toute la durée de la mesure. Sauf spécification contraire, des conditions atmosphériques normalisées définies dans l'IEC 60793-1-1 doivent être employées. Dans le cas de fibres et de câbles installés, les conditions de déploiement courantes peuvent être utilisées.

La stabilité mécanique et thermique du dispositif d'essai peut être observée en utilisant les procédures qui suivent. Pour la méthode A, la puissance de sortie provenant de la fibre à une longueur d'onde fixe est mesurée avec l'analyseur de sortie en place. Pendant une période correspondant à une mesure complète typique, il convient que la variation de la puissance de sortie soit faible par rapport aux variations produites par une augmentation de la longueur d'onde. Pour la méthode B, l'état de polarisation (SOP) de sortie de la fibre en essai sur une vue d'une sphère de Poincaré est visualisé. Pendant une période correspondant aux mesures d'une paire adjacente de la matrice de Jones, il convient que la variation de l'état de polarisation (SOP) de sortie soit faible par rapport à la variation produite par une augmentation de la longueur d'onde. La méthode C est normalement insensible par rapport à une légère variation de la température ou à de légers déplacements de la fibre.

Les extrémités d'entrée et de sortie de l'échantillon d'essai doivent être préparées conformément aux exigences applicables à l'appareillage et à la procédure. Des précautions doivent être prises pour éviter tout problème de réflexion.

6.2 Longueur des spécimens

La longueur des spécimens dépend de trois facteurs:

- a) le coefficient de PMD minimal souhaité;
- b) le régime de couplage de mode;
- c) le rapport signal sur bruit.

Chaque méthode d'essai et chaque mise en œuvre sont limitées à une valeur minimale de PMD (ps) qui peut être mesurée. Dans de nombreux cas, cette valeur minimale peut être déterminée sur une base théorique. Elle peut également être déterminée expérimentalement par l'analyse de la distribution mesurée. Pour des fibres en régime de couplage de mode aléatoire, le coefficient de PMD minimal est déterminé en divisant la valeur de PMD par la racine carrée de la longueur de la fibre (km). Dans le cas d'un couplage de mode négligeable, la valeur de PMD est divisée par la longueur. La longueur mesurée et la valeur de PMD minimale mesurable déterminent alors le coefficient de PMD minimal mesurable. Pour effectuer la mesure, des fibres ou des câbles ayant des longueurs suffisantes peuvent être sélectionnés pour permettre d'atteindre ce minimum. En variante, les spécimens peuvent être coupés à une longueur satisfaisante. La valeur de PMD minimale mesurable doit être documentée. La longueur de chaque spécimen doit être consignée. La longueur peut

également être limitée par la méthode de déploiement (se reporter à 6.3) et par la plage dynamique de l'appareil de mesure.

Les valeurs spécifiées dans l'IEC 60794-3 et l'IEC 60793-2-50 expriment le coefficient de PMD en $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$. En réalité, ces documents prennent pour hypothèse que la longueur mesurée suffit à induire le régime de couplage de mode aléatoire. Pour un type de fibre donné ou pour une construction de câble donnée, cela peut être confirmé en utilisant la méthode de la fibre coupée, pour laquelle la valeur de PMD est mesurée pour un spécimen sur des longueurs obtenues en raccourcissant le spécimen entre chaque mesure. Les longueurs de fibres au-dessus desquelles la valeur de la PMD dépend de la racine carrée de la longueur peuvent être considérées comme des longueurs à couplage de mode aléatoire.

La plage dynamique est limitée par la méthode, la puissance de la source et l'affaiblissement global du spécimen, qui est affecté par la longueur. En général, cette limite doit être déterminée sur la base de mises en œuvre spécifiques par des moyens expérimentaux. Cette limite doit être documentée.

6.3 Déploiement

6.3.1 Généralités

Le déploiement de la fibre ou du câble peut influencer le résultat. Pour des mesures normales destinées à évaluer la conformité à la spécification, les exigences suivantes s'appliquent.

6.3.2 Fibre non câblée

Il est important de réduire le plus possible le couplage de mode induit par le déploiement lors de la mesure de fibres non câblées, cela afin de satisfaire aux exigences primaires de la PMD_Q de la fibre câblée. Dans ce cas, la fibre doit être soutenue d'une certaine façon (habituellement sur un touret ayant un rayon d'enroulement minimal de 150 mm), avec quasiment aucune tension sur la fibre (typiquement moins de 5 g), et aucun entrecroisement tendu. Ces exigences relatives au déploiement peuvent limiter la longueur mesurable, en fonction du diamètre de la bobine et rendre les mesures destructives. Les enroulements multicouches sont possibles, mais il convient qu'ils soient qualifiés en les comparant à des résultats d'enroulements monocouches sur des longueurs plus petites.

Il est recommandé de ne pas effectuer de mesures sur des fibres non câblées déployées sur des bobines destinées à être expédiées. Il a été démontré que les résultats sur la PMD obtenus avec ce type de déploiement étaient nettement inférieurs à ceux qui auraient été obtenus sur des câbles prévus pour des fibres à haute valeur de PMD, et nettement supérieurs à ceux qui auraient été obtenus sur des câbles prévus pour des fibres à faible valeur de PMD.

6.3.3 Câble à fibres optiques

Les mesures de PMD sur des fibres contenues dans des câbles enroulés autour de tourets d'expédition peuvent ne pas toujours refléter les valeurs de PMD fonctionnellement pertinentes pour des fibres se trouvant dans la configuration de déploiement de câbles installés. Par conséquent, pour démontrer la conformité à la spécification concernant la PMD d'une fibre câblée, d'autres configurations de déploiement ou d'autres fonctions de nappage permettant d'établir un lien entre la valeur de PMD sur touret et la valeur de PMD hors touret peuvent être utilisées pour les mesures en usine. La configuration exacte du déploiement doit faire l'objet d'un accord entre le fournisseur et le client.

7 Procédure

La procédure est la suivante:

- a) Déployer la fibre ou le câble et préparer les extrémités.

- b) Fixer les extrémités à l'optique d'entrée et à l'optique de sortie.
- c) Utiliser le calculateur pour effectuer les analyses et les mesures indiquées dans les Annexes A, B et C pour les trois méthodes de mesure.
- d) Renseigner les documents.

8 Calcul ou interprétation des résultats

Les Annexes A, B et C contiennent des calculs permettant de convertir les données mesurées en valeurs de PMD. Les calculs du coefficient de PMD sont menés en fonction de la présence ou non d'un couplage de mode aléatoire ou d'un couplage de mode négligeable. Pour les fibres spécifiées dans l'IEC 60793-2-50, la valeur de la PMD, exprimée en $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, est normalisée par la racine carrée de la longueur de la fibre.

9 Documentation

9.1 Informations exigées pour chaque mesure

- a) Identification du spécimen;
- b) Date de l'essai;
- c) Longueur des spécimens;
- d) Zone de longueurs d'onde (par exemple 1 550 nm);
- e) La PMD en ps, et si la PMD_{MEAN} ou la PMD_{RMS} sont indiquées;
- f) Coefficient de PMD et ses unités ($\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ ou ps/km).

9.2 Informations à mettre à disposition

- a) Méthode de mesure utilisée;
- b) Méthode de calcul utilisée;
- c) Description de la méthode de déploiement (y compris tout mécanisme de soutien de la fibre);
- d) Plage de longueurs d'onde utilisée;
- e) Pour les méthodes A et B, avec source à bande étroite et en mode indiciel, le nombre de longueurs d'onde échantillonnées;
- f) Pour la méthode C, le type de technique de détection des franges;
- g) Description de l'équipement;
- h) Date du dernier étalonnage;
- i) Preuve à l'appui du régime de couplage de mode (indiqué par les unités du coefficient de PMD);
- j) Pour la méthode B avec source à bande étroite et en mode indiciel, la résolution de la plage de longueurs d'onde;
- k) Pour la méthode B employant une source à large bande, la longueur d'onde centrale et la largeur de raie à -3 dB;
- l) Tout écart par rapport à cette procédure.

10 Informations relatives à la spécification

- a) Type de fibre ou de câble;
- b) Critères de rejet ou d'acceptation.

Annexe A (normative)

Exigences spécifiques à la méthode A (FA) – Méthode de mesure par analyseur fixe

A.1 Appareillage

A.1.1 Schémas fonctionnels

La Figure A.1 représente les schémas fonctionnels possibles pour la méthode A.

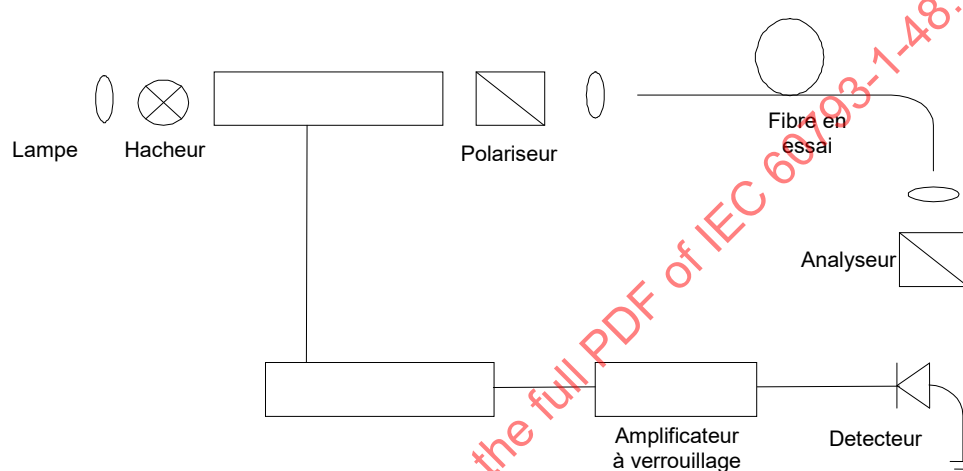
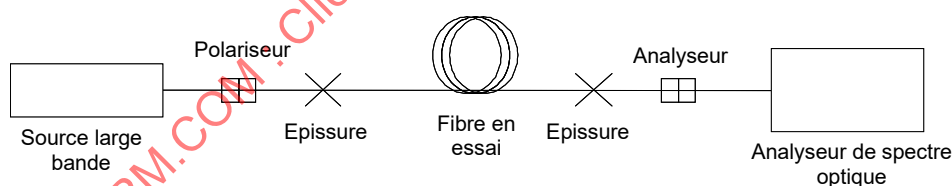


Figure A.1a – Source à bande étroite



IEC 782/07

Figure A.1b – Source à large bande

Figure A.1 – Schémas fonctionnels relatifs à la méthode A

A.1.2 Source de rayonnement lumineux

Dans tous les cas, deux types de sources de rayonnement lumineux peuvent être utilisés selon le type d'analyseur. Une source à bande étroite telle que la combinaison d'une lampe à large bande et d'un monochromateur représentée à la Figure A.1a peut être utilisée associée à un analyseur de polarisation. La source à large bande représentée à la Figure A.1b peut être utilisée avec un analyseur à filtre passe-bande étroit tel qu'un analyseur de spectre optique ou un interféromètre utilisé comme analyseur de spectre par transformée de Fourier placé avant l'analyseur. Dans le cas d'une source à large bande, la largeur du filtre est prise comme la largeur spectrale pour les besoins des calculs.

Dans les deux cas, la largeur spectrale doit être suffisamment petite pour maintenir le degré de polarisation souhaité (se reporter à 4.1). 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 (se reporter à l'Article A.3).

Pour garantir que toutes les caractéristiques dans le spectre optique aient une résolution adéquate, il convient que la largeur spectrale satisfasse à la condition suivante:

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

où

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

$\Delta\lambda$ est la largeur spectrale;

$\Delta\tau_{\max}$ est le retard de groupe différentiel (DGD) maximal prévu.

Pour une longueur d'onde λ voisine de 1 550 nm, l'Equation (A.1) se ramène à la condition où 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 réglage de l'analyseur peut s'avérer utile pour rendre maximale l'amplitude des oscillations représentées à la Figure A.2 (ceci peut également être obtenu par rotation de la fibre au niveau des épissures ou des connecteurs). Pour une approche par transformée de Fourier cosinus (CFT), l'analyseur doit pouvoir subir une rotation vers une position orthogonale à la position initiale.

NOTE L'analyseur peut être remplacé par un polarimètre.

A.2 Procédure

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

La procédure exige de mesurer la puissance en fonction des longueurs d'onde (ou des fréquences optiques) sur une certaine plage avec un incrément de longueur d'onde ou de fréquence optique défini, une fois avec l'analyseur inséré dans le chemin optique, et une fois sans l'analyseur inséré dans le chemin optique (ou une fois avec l'analyseur inséré dans le chemin optique, et une fois avec l'analyseur placé dans une position orthogonale à la position initiale). La plage de longueurs d'onde peut influencer la précision du résultat (se reporter à l'Article A.3). Il convient de choisir l'incrément de longueur d'onde de manière à satisfaire à l'Equation (A.1), sachant que l'incrément de longueur d'onde remplace $\Delta\lambda$.

Si les approches avec la transformée de Fourier (FT) ou la transformée de Fourier cosinus (CFT) sont utilisées, il convient idéalement que la taille des pas soit uniforme en fréquence optique et que le nombre de pas soit une puissance de 2. La taille de pas du monochromateur, exprimée en fréquence optique, $\delta\nu$, doit être deux fois inférieure à la fréquence d'oscillation correspondant au retard de groupe différentiel (DGD) maximal mesuré. En raison de la grande quantité de puissance de part et d'autre du moment d'ordre deux pour les fibres à couplage de mode aléatoire, la condition de Nyquist doit être égale à au moins trois fois la fréquence du moment d'ordre deux pour le DGD maximal prévu. A savoir:

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

Si, à partir de la transformée de Fourier, il est évident qu'une quantité importante d'énergie est présente au voisinage de $\Delta\tau_{\max}$, il convient de réduire l'incrément et de répéter la mesure.

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 typique.

A.2.2 Balayages

Effectuer un balayage avec l'analyseur installé dans le chemin du rayonnement lumineux. Enregistrer la puissance reçue en la désignant par $P_A(\lambda)$.

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

Calculer le rapport de puissance, $R(\lambda)$, comme suit. La Figure A.2 montre un exemple de résultats de couplage de mode à la fois négligeable et aléatoire.

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

Une procédure alternative consiste à laisser l'analyseur en place sur le second balayage, mais à lui faire subir 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 Le rapport P_A/P_B peut également être utilisé si le comptage d'extrêmes est utilisé.

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 elles correspondent aux trois fonctions indépendantes de rapports de puissance qui peuvent être analysées de la même manière.

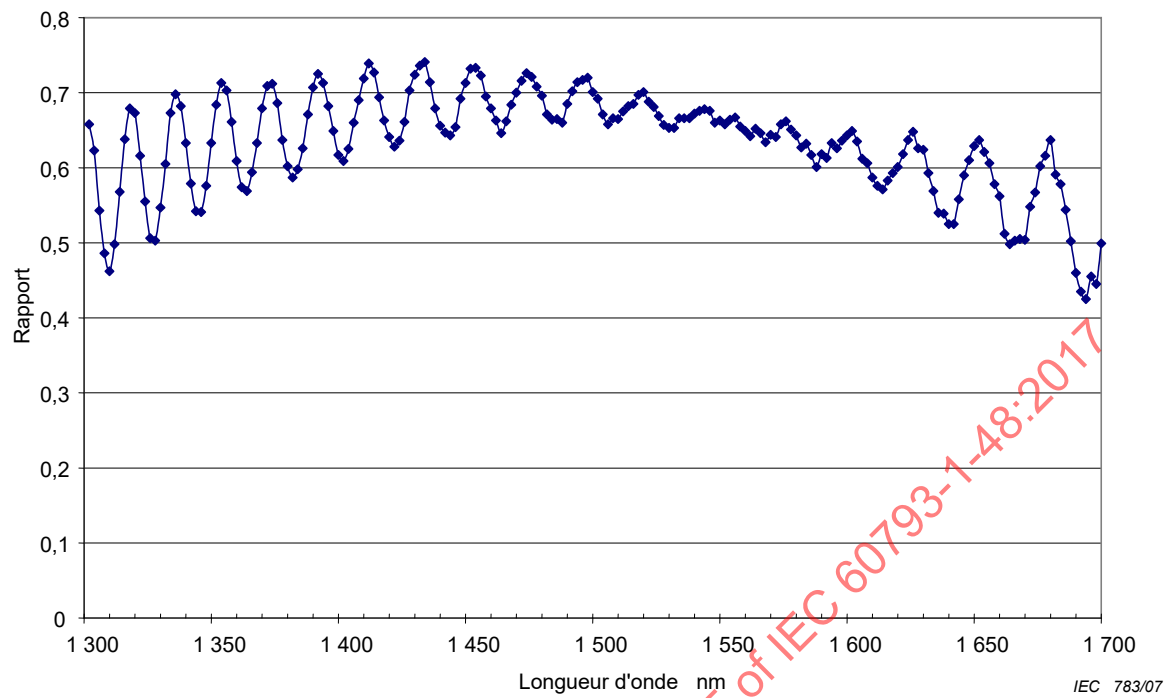


Figure A.2a – Couplage de mode négligeable

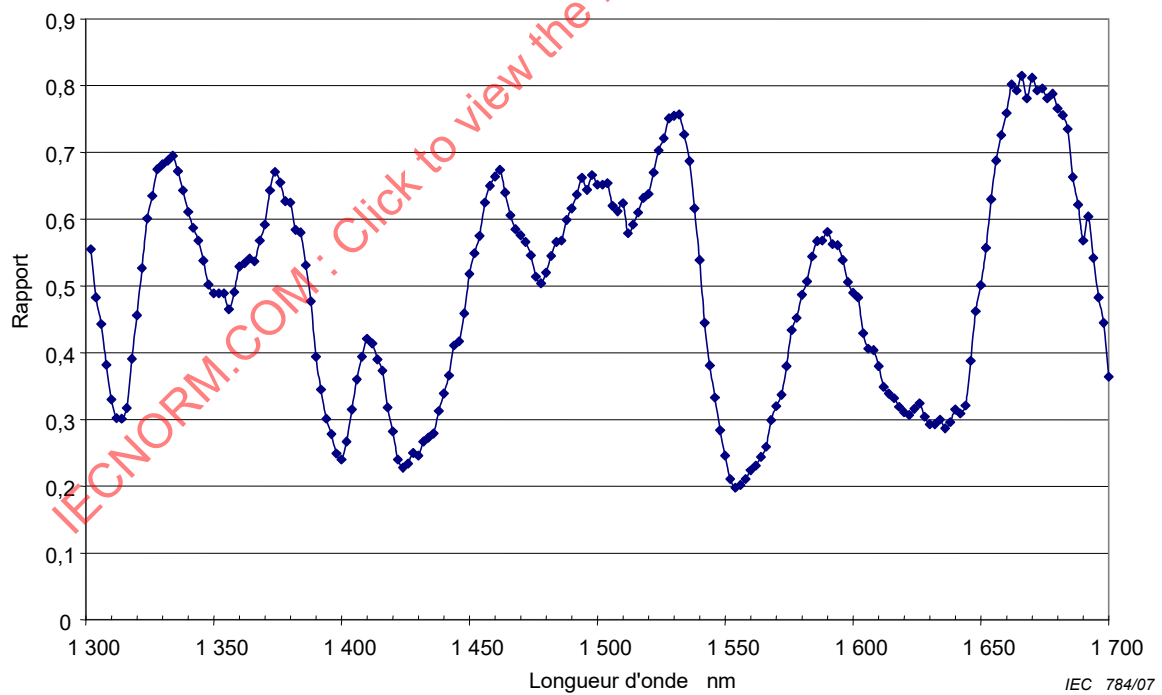


Figure A.2b – Couplage de mode aléatoire

Figure A.2 – Résultats typiques de la méthode A

A.3 Calculs

A.3.1 Méthodes de calcul de la PMD

Il existe trois méthodes de calcul de la dispersion de mode de polarisation (PMD) à partir de la fonction R mesurée:

- a) comptage des extrêmes;
- b) transformée de Fourier;
- c) transformée de Fourier cosinus.

A.3.2 Comptage des extrêmes

Il convient d'obtenir $R(\lambda)$ à des intervalles de longueur d'onde espacés régulièrement entre une longueur d'onde minimale λ_1 et une longueur d'onde maximale λ_2 . E est le nombre d'extrêmes (maximum et minimum) à l'intérieur de la fenêtre. En variante, la plage de longueurs d'onde peut être redéfinie de manière à ce que λ_1 et λ_2 coïncident avec les extrêmes, auquel cas E est le nombre d'extrêmes (incluant λ_1 et λ_2) moins un. La formule pour la valeur de PMD, $\langle \Delta\tau \rangle$, est:

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{kE\lambda_1\lambda_2}{2c(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (\text{A.5})$$

où

c est la vitesse du rayonnement lumineux dans le vide;

k est un facteur de couplage de mode égal à 1,0 en l'absence de couplage de mode aléatoire et à 0,82 dans la limite de couplage de mode aléatoire.

Si un polarimètre est utilisé comme élément de détection, la moyenne des valeurs obtenues à partir des trois réponses aux paramètres de Stokes normalisés est prise comme valeur finale de PMD.

En présence de bruit, les extrêmes peuvent être difficiles à déterminer. Une solution consiste à modéliser les données par un polynôme dont les extrêmes peuvent être évalués en tout point. Un polynôme d'ordre trois couvrant huit longueurs d'onde a été utilisé avec succès.

A.3.3 Transformée de Fourier

A.3.3.1 Généralités

Dans cette méthode, une analyse de Fourier de $R(\lambda)$, généralement exprimée dans le domaine des fréquences optiques ν , est utilisée pour déduire la PMD. La transformée de Fourier transforme ces données du domaine des fréquences optiques en domaine temporel. La transformée de Fourier fournit des informations directes concernant la distribution des temps d'arrivée du rayonnement lumineux $\delta\tau$. Ces données sont post-traitées comme décrit ci-dessous pour en déduire la PMD attendue, $\langle \Delta\tau \rangle$, pour la fibre en essai. Cette méthode est applicable aux fibres à couplage de mode négligeable ou aléatoire.

A.3.3.2 Prétraitement des données et transformée de Fourier

Pour utiliser cette méthode, la transformée de Fourier exige normalement des intervalles de fréquence optique égaux, de sorte que les données $R(\lambda)$ soient collectées à des valeurs λ telles qu'elles forment des intervalles égaux dans le domaine des fréquences optiques. En variante, des données prises à des intervalles λ égaux peuvent être ajustées (par exemple en utilisant un ajustement par fonction spline du 3^e degré) et une 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'Equation (A.3) ou l'Equation (A.4), selon le cas.

Une correction de zéro ou une interpolation de données et le retrait du niveau continu peuvent être appliqués aux données du rapport $R(\lambda)$. L'encadrement des données peut également être utilisé comme une étape de préconditionnement avant d'effectuer la transformée de Fourier. La transformée de Fourier est maintenant effectuée pour produire la distribution des données en amplitude $P(\delta\tau)$ pour chaque valeur de $\delta\tau$.

A.3.3.3 Adaptation des données de la transformée

Les données de la transformée de Fourier à zéro $\delta\tau$ ont peu de sens, à moins d'être retirées avec soin, les composantes continues dans $R(\lambda)$ peuvent être partiellement dues à 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 ignorés (pas utilisés) dans tout calcul ultérieur. Une variable, j , peut être définie de manière à ce que le "premier intervalle valide" situé 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 typiques des fibres à couplage de mode négligeable. La valeur de X est égale à trois, excepté dans le cas où une correction de zéro est utilisée dans l'analyse de Fourier. Dans ce cas, la valeur de X peut être déterminée à partir de 3 fois le nombre de points de données d'origine divisé par la longueur totale du tableau après correction de zéro.

La PMD est calculée en utilisant l'Equation (A.6) pour une fibre à couplage de mode négligeable ou en utilisant l'Equation (A.7) pour une fibre à couplage de mode aléatoire.

A.3.3.4 Calcul de la dispersion de mode de polarisation (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, $R(\lambda)$ ressemble à une onde sinusoïdale modulée en fréquence (se reporter à la Figure A.2a). La transformée de Fourier donnera 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 de la PMD $\langle\Delta\tau\rangle$.

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

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

où

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

Dans l'Equation (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 zéro. D'autres paramètres, tels que la largeur efficace du transitoire ou la valeur de crête du transitoire, peuvent être indiqués.

Si le dispositif en essai contient un ou plusieurs éléments biréfringents, plusieurs transitoires seront générés. Un nombre n de fibres/dispositifs mis bout à bout, produit jusqu'à $2^{(n-1)}$ transitoires.

A.3.3.5 Calcul de la dispersion de mode de polarisation (PMD) pour des fibres à couplage de mode aléatoire

Dans les cas de couplage de mode aléatoire, $R(\lambda)$ devient une forme d'onde complexe similaire à celle représentée à la Figure A.2b, les caractéristiques exactes étant fondées sur les statistiques réelles du processus de couplage à l'intérieur de la fibre/du câble. Les données ayant subi une transformée de Fourier deviennent maintenant une distribution $P(\delta\tau)$ représentant la combinaison des fonctions d'autocorrélation et d'intercorrélation des temps d'arrivée de l'impulsion lumineuse dans la fibre, $\delta\tau$ (se reporter à la Figure A.3).

En comptant à partir de $j = 0$, 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 , est déterminé. Ce point représente le dernier point significatif (c'est-à-dire "l'extrémité") de la distribution $P(\delta\tau)$, 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 $\delta\tau_{\text{last}}$ et la valeur de j à $\delta\tau_{\text{last}}$ est notée M'' .

La racine carrée du moment d'ordre deux de cette distribution, σ_R , définit la dispersion de mode de polarisation (PMD) $\langle \Delta\tau \rangle$ de la fibre, et est donnée par:

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

A.3.3.6 Calcul de la dispersion de mode de polarisation (PMD) pour des systèmes de fibres à couplage mixte

Il peut y avoir des cas où des fibres/composants à couplage négligeable et une ou plusieurs fibres à couplage aléatoire sont mises bout à bout pour former le système en essai. Dans de tels cas, à la fois la détermination du centre, Equation (A.6), et la dérivée du moment d'ordre deux, Equation (A.7), peuvent être exigées. Noter que les transitoires dans $P(\delta\tau)$ ne peuvent être déterminés qu'au-delà du $\delta\tau_{\text{last}}$ calculé.

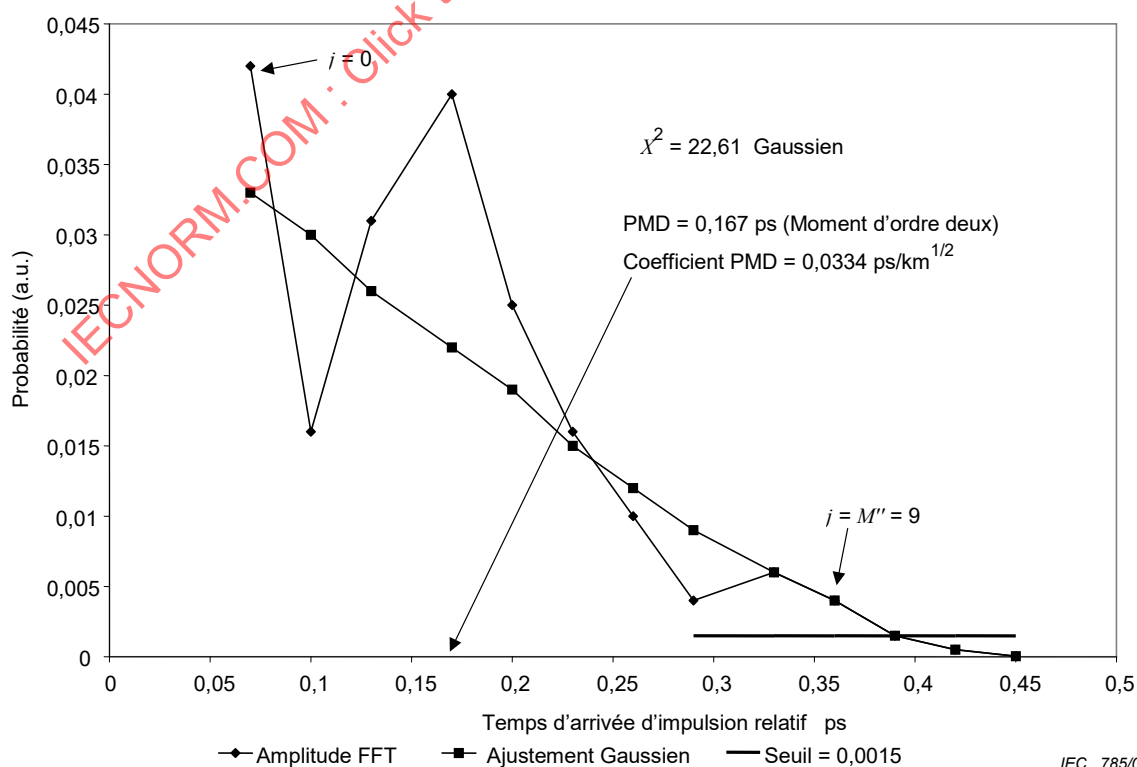


Figure A.3 – Dispersion de mode de polarisation (PMD) par analyse de Fourier

A.3.4 Analyse de Fourier cosinus

A.3.4.1 Généralités

Cette analyse est fondée sur le fait que la transformée de Fourier cosinus du spectre émis en sortie de l'analyseur est le motif de franges de l'interférogramme qui serait obtenu par la méthode C. La différence entre les motifs de franges générés par l'analyseur configuré en deux positions orthogonales est la fonction d'intercorrélation. Dans l'analyseur, un spectre infini donne une fonction d'autocorrélation de largeur nulle. Dans la pratique, le spectre fini de la source dans le domaine des fréquences optiques se comporte comme une fonction d'encadrement qui génère une fonction d'autocorrélation dans le domaine temporel de largeur non nulle.

L'analyse des fonctions d'intercorrélation et d'autocorrélation élevées au carré, déterminées par la méthode C, l'analyse GINTY [4], montre que la différence des largeurs efficaces élevées au carré de ces fonctions est proportionnelle au carré des valeurs efficaces pondérées spectralement (par la puissance au carré) des valeurs du DGD (se reporter à l'Equation (C.9)).

Le résultat est indépendant de la forme spectrale, ce qui signifie que les détails de la fonction d'encadrement sont totalement pris en compte. Il est aussi indépendant du degré du couplage de mode, ce qui signifie qu'aucune modification d'algorithme n'est nécessaire pour traiter les différents régimes de couplage de mode.

Le résultat est limité par la largeur spectrale et l'incrément de fréquence optique mesuré. Si la PMD croît, l'incrément de fréquence doit décroître. Dans certains cas limites, il est plus pratique d'utiliser la méthode C (GINTY).

L'analyse fournit la métrique de PMD_{RMS} . En présence d'un couplage de mode aléatoire, le résultat peut être converti en PMD_{MEAN} en utilisant l'Equation (3).

A.3.4.2 Vue d'ensemble

Les mesures des puissances émises en sortie de l'analyseur placé en deux positions orthogonales sont exigées. Le taux, R , associé à l'Equation (A.4) est modifié de la façon suivante:

$$R(\nu) = \frac{P_A(\nu) - P_B(\nu)}{P_A(\nu) + P_B(\nu)} \quad (A.8)$$

où

$\nu = c / \lambda$ est la fréquence optique (THz).

Si un polarimètre est utilisé, les trois éléments de sortie normalisés du vecteur de Stokes sont équivalents à trois taux normalisés indépendants, équivalents à ceux représentés par l'Equation (A.8). Chaque élément du vecteur de Stokes est la différence en puissance entre les positions orthogonales de l'analyseur. Les trois éléments sont différents du fait que les positions de base sont aussi orthogonales.

Les données sont multipliées par une fonction d'encadrement, $W(\nu)$, qui décroît vers zéro régulièrement au niveau des bords. $R(\nu)W(\nu)$ et $W(\nu)$ sont mis sous forme de matrices, avec une correction de zéro aux fréquences basses, non mesurées. Des transformées de Fourier cosinus rapides (FCFT) sont appliquées à chaque matrice, pour obtenir les enveloppes des franges dans le domaine temporel, $r(t)w(t)$ et $w(t)$. Celles-ci sont élevées au carré, pour obtenir les enveloppes d'intercorrélation et d'autocorrélation élevées au carré, E_x^2 et E_0^2 , respectivement. Quand des fonctions à rapports multiples (N) sont disponibles à partir des différentes combinaisons de configurations du polariseur d'entrée et de configurations de base de l'analyseur (ou d'autres éléments de sortie du vecteur de Stokes), utilisant par

exemple un brouilleur d'états de polarisation d'entrées/sorties, établir la moyenne quadratique des enveloppes de la façon suivante:

$$\overline{E_x^2} = \frac{1}{N} \sum_i E_{xi}^2 \quad (\text{A.9})$$

$$\overline{E_0^2} = \frac{1}{N} \sum_i E_{0i}^2 \quad (\text{A.10})$$

A partir du calcul de la valeur efficace décrite en D.2, calculer les largeurs efficaces σ_x et σ_0 de ces deux fonctions. La valeur PMD_{RMS} est calculée comme suit:

$$PMD_{\text{RMS}} = \sqrt{\left[\frac{3}{2} (\sigma_x^2 - \sigma_0^2) \right]} \quad (\text{A.11})$$

Elle est liée à la valeur efficace pondérée spectralement (par une valeur d'encadrement élevée au carré) du DGD de la façon suivante:

$$\langle PMD_{\text{RMS}} \rangle = \frac{\int \Delta\tau^2(\nu) W^2(\nu) d\nu}{\int W^2(\nu) d\nu} \quad (\text{A.12})$$

La valeur attendue est concordante avec les SOP d'entrées/sorties aléatoires.

A.3.4.3 Détails

Ce paragraphe explique certains détails relatifs à la fenêtre des fréquences mesurées, l'incrément de fréquence, $\Delta\nu$, le décalage en fréquence et le résultat de la FCFT. Un exemple d'algorithme de FCFT peut être obtenu en [5].

Les données doivent être présentées sous forme d'incrément de fréquence uniformes. Le nombre de points de données, y compris les valeurs de correction de zéro, doit être $1+2^k$, avec k entier.

Si les N points de données mesurées ne sont pas sous forme d'incrément de fréquences uniformes, ils peuvent être modélisés par un polynôme tel qu'une fonction spline en vue d'une d'interpolation. Une fonction spline d'ordre trois [6] avec $N-3$ segments uniformes modélisera parfaitement toutes les données et permettra l'interpolation.

Etant donné que les valeurs mesurées sont délimitées par $\nu_{\min M}$ et $\nu_{\max M}$, et du fait que la fréquence optique minimale est largement supérieure à zéro, un décalage de fréquence peut être appliqué afin de réduire la taille des matrices traitées. Les délimitations de fréquence utilisées dans les matrices de calcul peuvent être sélectionnées par n'importe quel choix de n , tel que:

$$\nu_{\max} \frac{n-1}{n} = \nu_{\min} \leq \nu_{\min M}, \quad \nu_{\max} = \nu_{\max M}, \quad \text{avec } n \text{ entier positif.} \quad (\text{A.13})$$

Les valeurs aux fréquences inférieures à la fréquence mesurée sont mises à zéro.

Après la FCFT, la matrice contient le motif de franges dans le domaine temporel, de 0 à $t_{\max} = \Delta t 2^k$, où l'incrément de temps, Δt , est donné par:

$$\Delta t = \frac{n}{2\nu_{\max}} = \frac{1}{2(\nu_{\max} - \nu_{\min})} \quad (\text{A.14})$$

Le motif de franges obtenu par l'interférométrie s'étend aux valeurs de temps négatives et positives. La valeur à un temps négatif donné est égale à la valeur au temps positif. La fonction est paire et symétrique par rapport à zéro.

Il convient d'effectuer la sélection du décalage de fréquence en gardant à l'esprit que le calcul de la largeur efficace nécessite des valeurs dans le domaine temporel inférieures à la PMD_{RMS} minimale mesurable.

L'incrément de fréquence, $\Delta \nu$, se rapporte aussi au nombre de points d'échantillonnage, au décalage de fréquence et à la PMD_{RMS} maximale à mesurer. Il est donné, accompagné de sa contrainte, par l'équation suivante:

$$\Delta \nu = \frac{\nu_{\max} - \nu_{\min}}{2^k} \leq \frac{1}{24 PMD_{\text{RMS-max}}} \quad (\text{A.15})$$

Il convient que la largeur spectrale de la source filtrée soit la moitié de cette valeur. Quand le balayage réel est réalisé en incréments de longueur d'onde égaux, il convient que l'incrément de longueur d'onde à l'extrémité inférieure de la plage soit cohérent avec la contrainte de l'Equation (A.14).

La fonction d'encadrement, $W(\nu)$, peut techniquement être n'importe quelle fonction, y compris une fonction d'élévation au carré. Il convient que la fonction choisie réduise σ_0 à sa valeur minimale. De telles fonctions tendent vers zéro aux limites de façon continue, et il convient que leurs dérivées premières tendent vers zéro aux limites. Cela réduira à sa valeur minimale l'oscillation transitoire qui peut accroître σ_0 .

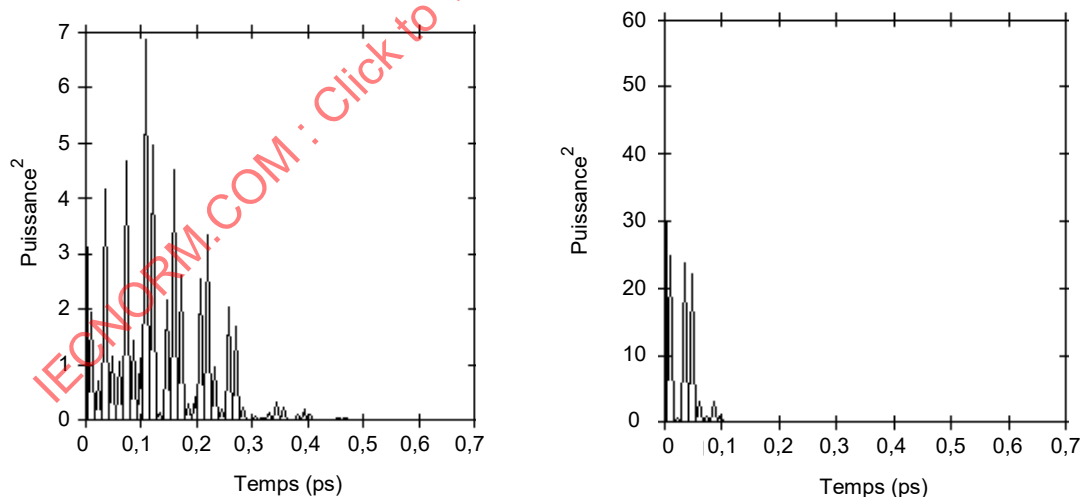
A.3.4.4 Exemples

Le Tableau A.1 est un exemple de feuille de calcul. Les extrêmes de longueur d'onde ainsi que k sont fournis. Pour chacune des valeurs de décalage de fréquence possible, n , les autres paramètres sont calculés. minPMD est calculé comme $3\Delta t$. L'incrément en termes de $\Delta \lambda$ à la limite de longueur d'onde inférieure est aussi représenté. Il y a clairement des compensations en fonction de la plage des valeurs de PMD_{RMS} qui doivent être mesurées. En général, les meilleurs résultats sont obtenus avec une large plage de longueurs d'onde et un faible incrément de fréquence.

Tableau A.1 – Calculs par transformée cosinus

c	299792,5	nm/ps				
k	11					
npt	2048					
longueurs d'ondes (nm)		fréquences (THz)				
max	1700	230,6096				
min	1300	176,3485				
Décalage de fréquences						
n	freqmincalc (THz)	del-t (ps)	delfreq (THz)	minPMD (ps)	maxPMD (ps)	incrément d'onde (nm)
1	0	0,002168	0,112602	0,006504	0,370034	0,635076
2	115,3048077	0,004336	0,225205	0,013009	0,185017	1,270772
3	153,7397436	0,006504	0,337807	0,019513	0,123345	1,90709
4	172,9572115	0,008673	0,450409	0,026018	0,092508	2,544031
5	184,4876923	0,010841	0,563012	0,032522	0,074007	3,181596
6	192,1746795	0,013009	0,675614	0,039027	0,061672	3,819785
7	197,6653846	0,015177	0,788216	0,045531	0,052862	4,458599
8	201,7834135	0,017345	0,900819	0,052036	0,046254	5,098039

La Figure A.4 donne les résultats de ce qui pourrait être obtenu sur une fibre ayant $PMD_{RMS} = 0,2$ ps. Les enveloppes moyennes des fonctions d'intercorrélation et d'autocorrélation, obtenues à partir d'un seul balayage, en utilisant une fonction d'encadrement gaussienne avec un écart-type de 23 nm sont présentées. Le résultat est obtenu à partir de la simulation d'une fibre avec un couplage de mode aléatoire idéal. Le résultat mesuré pour cette simulation était de 0,185 ps.



IEC 786/07

Figure A.4 – Fonctions d'intercorrélation et d'autocorrélation

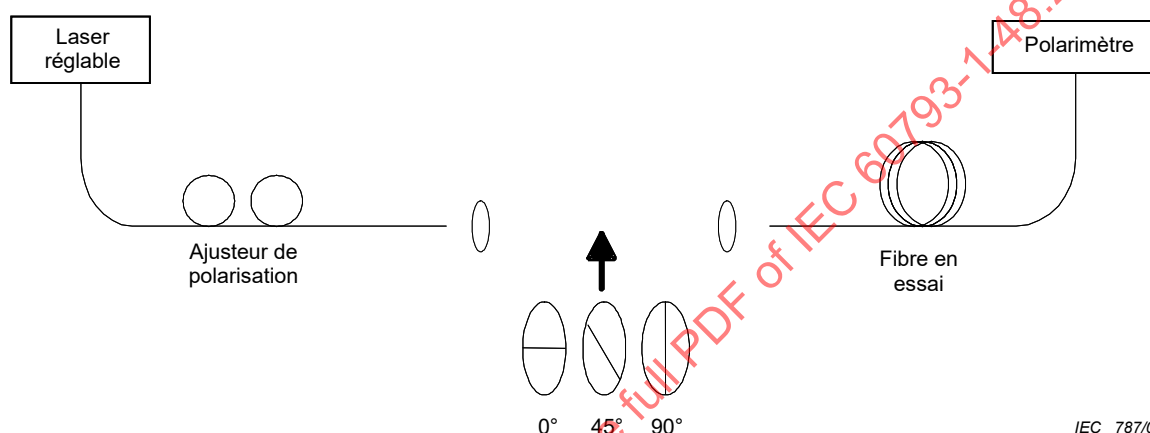
Annexe B (normative)

Exigences spécifiques à la méthode B (SPE) – Méthode d'évaluation des paramètres de Stokes

B.1 Appareillage

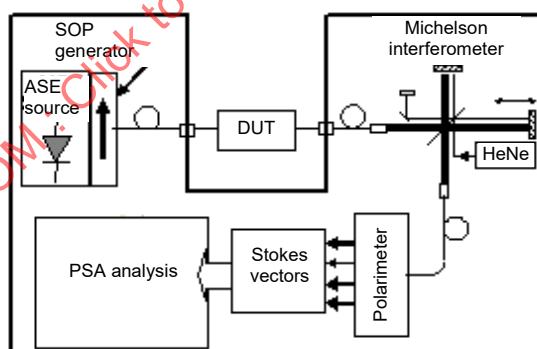
B.1.1 Schéma fonctionnel

La Figure B.1 représente un schéma fonctionnel possible pour la méthode B.



IEC 787/07

Figure B.1a – Source à bande étroite (JME)



IEC 788/07

Figure B.1b – Source à large bande (PSA)

Figure B.1 – Schéma fonctionnel pour la méthode B

B.1.2 Source de rayonnement lumineux

Dans tous les cas, deux types de sources de rayonnement lumineux peuvent être utilisés, selon le type de polarimètre. Une source à bande étroite, telle qu'un laser réglable, indiqué à la Figure B.1a, peut être utilisée avec un analyseur de polarisation. De façon alternative, une source à large bande, représentée à la Figure B.1b, peut être utilisée avec un polarimètre à filtre passe-bande étroit, tel qu'un analyseur de spectre optique ou un interféromètre utilisé comme analyseur de spectre par transformée de Fourier placé avant le polarimètre. Dans le cas d'une source à large bande, la largeur du filtre est prise comme la largeur spectrale pour les besoins des calculs.

Dans les deux cas, la largeur spectrale doit être suffisamment faible pour maintenir le degré de polarisation (DOP) souhaité (se reporter à 3.1). Dans les deux cas, la plage de longueurs d'onde doit être suffisamment étendue pour permettre de mesurer la dispersion de mode de polarisation (PMD) avec une précision suffisante dans la zone de longueur d'onde spécifiée (se reporter à l'Article B.3).

Pour les méthodes d'analyse des valeurs propres de la matrice de Jones (JME) et de la sphère de Poincaré (PSA), le polariseur doit être capable de commuter entre trois polarisations linéaires orthogonales (nominalement 0°, 45° et 90°) pour chaque longueur d'onde mesurée.

B.1.3 Polarimètre

Utiliser un polarimètre pour mesurer les vecteurs de Stokes en sortie pour chaque degré de polarisation et chaque longueur d'onde d'entrée sélectionnés.

B.2 Procédure

La sortie de la fibre est couplée au polarimètre. Les longueurs d'onde sont balayées sur une plage appropriée par rapport à la zone de longueur d'onde et à la précision souhaitée (se reporter à l'Article 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 du DGD maximale anticipée, $\Delta\tau_{\max}$, de la longueur d'onde de la zone mesurée, λ_0 , et de la vitesse du rayonnement lumineux dans le vide, c , 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 du pas doit rester inférieur à 4 ps·nm pour une longueur d'onde de 1 550 nm et inférieur à 2,8 ps·nm pour une longueur d'onde de 1 300 nm. Cette exigence assure qu'entre une longueur d'onde d'essai et la suivante, le SOP de sortie subit une rotation inférieure à 180° autour de l'axe des PSP de la sphère de Poincaré. Si $\Delta\tau_{\max}$ ne peut pas être estimé approximativement, une série de mesures sur des échantillons est effectuée sur toute la plage des longueurs d'onde, en utilisant pour chaque mesure une paire de longueurs d'onde très voisines appropriée par rapport à la largeur spectrale et le pas de réglage minimal de la source optique. Le retard de groupe différentiel (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 l'intervalle de longueur d'onde utilisé pour une mesure risque d'être trop grand, la mesure peut être répétée en utilisant un plus petit intervalle de longueur d'onde. Si la forme de la courbe du DGD en fonction de la longueur d'onde et le DGD moyen ne sont pas modifiés, l'intervalle de longueur d'onde initial était satisfaisant.

Pour des sources à large bande (BBS), la largeur de bande de résolution (RBW) de l'analyseur doit remplir la condition suivante:

$$\text{RBW} \leq \frac{\lambda_0^2}{5c\Delta\tau_{\max}} \quad (\text{B.2})$$

Les données de mesure sont collectées pour chaque longueur d'onde. Pour les calculs par la méthode d'analyse des valeurs propres de la matrice de Jones (JME) ou par la méthode d'analyse de la sphère de Poincaré (PSA), les trois états de polarisation (SOP) d'entrée sont évalués cycliquement entre les valeurs nominales de 0°, 45° et 90° pour chaque longueur d'onde, et enregistrés dans les vecteurs correspondants. Pour la méthode PSA et la méthode

JME, les vecteurs en sortie sont normalisés à l'unité de longueur et enregistrés comme $\hat{H}$, $\hat{Q}$ et $\hat{V}$ pour les trois états de polarisation d'entrée, respectivement.

B.3 Calculs

B.3.1 Principe

Les trois méthodes de calcul exigent une évaluation des différences entre les états de polarisation à une fréquence optique angulaire, ω_0 , et la suivante à $\omega_0 + \Delta\omega$. (La fréquence optique angulaire est donnée par $\omega = 2\pi c/\lambda$.) Les trois méthodes de calcul aboutissent toutes à une série de valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) en fonction de la longueur d'onde. Dans le cas d'un couplage de mode négligeable, les valeurs du DGD sont typiquement constantes en fonction de la longueur d'onde. Dans le cas d'un couplage de mode aléatoire, les valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) varient typiquement en fonction de la longueur d'onde, comme représenté à la Figure B.2. En variante, les valeurs du DGD peuvent être affichées sous la forme d'un histogramme tel que celui représenté à la Figure B.3. La moyenne de ces valeurs du DGD est donnée comme la valeur de la PMD utilisée en coefficient de conjonction.

La formulation mathématique détaillée et les calculs de la méthode B pour les trois méthodes, ainsi que le lien théorique entre les méthodes JME et PSA sont donnés dans l'IEC/TR 61282-9.

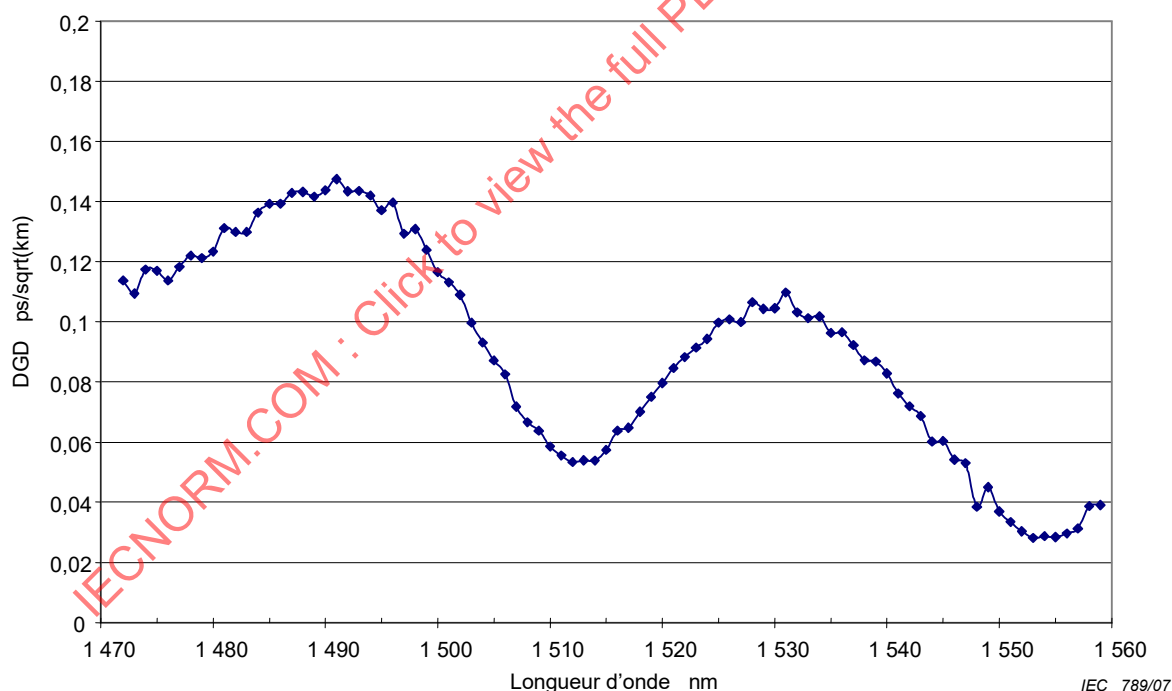


Figure B.2 – Résultats typiques d'un couplage de mode aléatoire par la méthode B