

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61280-4-4

Première édition
First edition
2006-02

**Procédures d'essai des sous-systèmes
de télécommunication à fibres optiques –**

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

**Fibre optic communication subsystem
test procedures –**

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



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61280-4-4:2006

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique. Des renseignements relatifs à cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- **Site web de la CEI (www.iec.ch)**
- **Catalogue des publications de la CEI**

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (www.iec.ch/searchpub) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- **IEC Just Published**

Ce résumé des dernières publications parues (www.iec.ch/online_news/justpub) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- **Service clients**

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

Email: custserv@iec.ch
Tél: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Further information on IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology. Information relating to this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is also available from the following:

- **IEC Web Site (www.iec.ch)**
- **Catalogue of IEC publications**

The on-line catalogue on the IEC web site (www.iec.ch/searchpub) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- **IEC Just Published**

This summary of recently issued publications (www.iec.ch/online_news/justpub) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- **Customer Service Centre**

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

Email: custserv@iec.ch
Tel: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61280-4-4

Première édition
First edition
2006-02

**Procédures d'essai des sous-systèmes
de télécommunication à fibres optiques –**

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

**Fibre optic communication subsystem
test procedures –**

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

© IEC 2006 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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'éditeur.

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 the publisher.

International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembe, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE **XB**

*Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	6
1 Domaine d'application	10
2 Références normatives.....	12
3 Symboles et abréviations.....	12
4 Propriétés de la dispersion en mode de polarisation: présentation générale	14
5 Méthodes de mesure	16
5.1 Méthodes de mesure de la PMD.....	16
5.2 Méthode d'essai de référence.....	24
6 Appareillage	24
6.1 Source de lumière et polariseurs	24
6.2 Optique d'entrée.....	26
6.3 Extracteur de mode de gaine.....	26
6.4 Filtre de mode d'ordre élevé	26
6.5 Positionneur de sortie.....	26
6.6 Optique de sortie.....	26
6.7 Détecteur	28
6.8 Calculateur.....	28
6.9 Moyen pour réduire les phénomènes d'émission spontanée amplifiée	28
7 Échantillonnage et échantillons en essai	28
8 Procédure	28
9 Calcul ou interprétation des résultats.....	28
10 Documentation	30
10.1 Informations requises pour chaque mesure	30
10.2 Informations nécessairement disponibles	30
11 Informations relatives à la spécification	30
Annexe A (normative) Méthode de l'analyseur fixe.....	32
Annexe B (normative) Méthode dévaluation des paramètres de Stokes.....	46
Annexe C (normative) Méthode interférométrique	60
Annexe D (normative) Méthode d'évaluation des paramètres de Stokes utilisant la lumière rétro réfléchée.....	80
Annexe E (normative) Méthode du déphasage par modulation	84
Annexe F (normative) Méthode de déphasage par polarisation	106
Annexe G (informative) Détermination de la dispersion de mode de polarisation (PMD) par la Méthode C	122
Bibliographie.....	130
Figure A.1 – Schémas relatifs à l'analyseur fixe.....	32
Figure A.2 – Exemple de fonction <i>R</i> pour la méthode à analyseur fixe	36
Figure A.3 – Dispersion de mode de polarisation (PMD) par l'analyse de Fourier.....	42

CONTENTS

FOREWORD.....	7
1 Scope.....	11
2 Normative references	13
3 Symbols and abbreviated terms.....	13
4 Background on PMD properties	15
5 Measurement methods	17
5.1 Methods of measuring PMD.....	17
5.2 Reference test method	25
6 Apparatus.....	25
6.1 Light source and polarizers	25
6.2 Input optics	27
6.3 Cladding mode stripper	27
6.4 High-order mode filter.....	27
6.5 Output positioner.....	27
6.6 Output optics	27
6.7 Detector	29
6.8 Computer	29
6.9 Means to reduce the effects of amplified spontaneous emission.....	29
7 Sampling and specimens.....	29
8 Procedure	29
9 Calculation or interpretation of results	29
10 Documentation	31
10.1 Information required for each measurement	31
10.2 Information to be available	31
11 Specification information	31
Annex A (normative) Fixed analyzer method.....	33
Annex B (normative) Stokes parameter evaluation method	47
Annex C (normative) Interferometric method.....	61
Annex D (normative) Stokes parameter evaluation method using back-reflected light	81
Annex E (normative) Modulation phase-shift method.....	85
Annex F (normative) Polarization phase shift method.....	107
Annex G (informative) PMD determination by Method C.....	123
Bibliography.....	131
Figure A1 – Block diagrams for fixed analyzer	33
Figure A2 – Example of the R-function for the fixed analyzer method.....	37
Figure A3 – PMD by Fourier analysis	43

Figure B.1 – Représentation schématique pour la méthode B utilisant une source à bande étroite (laser accordable)	46
Figure B.2 – Représentation schématique pour la méthode B utilisant une source à large bande (émission spontanée amplifiée (ASE))	46
Figure C.1 – Montage générique pour la méthode D (INTY)	60
Figure C.2 – Représentation schématique pour la Méthode D (TINTY).....	62
Figure C.3 – Données typiques obtenues par la Méthode C (TINTY).....	66
Figure C.4 – Représentation schématique pour la Méthode C (TINTY).....	68
Figure C.5 – Données de couplage de mode aléatoire typiques obtenues par la Méthode C (GINTY)	74
Figure C.6 – Données de couplage de mode mélangé typiques obtenues par la Méthode C (GINTY)	76
Figure D.1 – Disposition pour la Méthode D	80
Figure E.1 – Appareillage de base	84
Figure E.2 – Disposition de l'appareillage dans le cas de la modulation de la polarisation.....	92
Figure E.3 – États de Mueller sur la sphère de Poincaré.....	98
Figure E.4 – Retard de groupe différentiel (DGD) en fonction de la longueur d'onde.....	100
Figure E.5 – Histogramme du retard de groupe différentiel (DGD)	102
Figure F.1 – Représentation schématique pour la méthode F (déphasage par polarisation).....	106
Figure F.2 – Retard de groupe différentiel (DGD) en fonction de la longueur d'onde pour un dispositif à couplage de mode aléatoire	114
Tableau E.1 – Exemple d'ensemble de Mueller	98

Figure B1 – Block diagram for Method B using a narrowband (tuneable laser) source.....	47
Figure B2 – Block diagram for Method B using a broadband (ASE) source.....	47
Figure C1 – Generic set-up for Method C (INTY).....	61
Figure C2 – Schematic diagram for Method C (TINTY).....	63
Figure C3 – Typical data obtained by Method C (TINTY).....	67
Figure C4 – Schematic diagram for Method C (GINTY).....	69
Figure C5 – Typical random-mode-coupling data obtained by Method C (GINTY)	75
Figure C6 – Typical mixed-mode-coupling data obtained by Method C (GINTY).....	77
Figure D1 – Layout for Method D	81
Figure E1 – Basic apparatus.....	85
Figure E2 – Apparatus layout for polarization modulation.....	93
Figure E3 – Mueller states on Poincaré sphere	99
Figure E4 – DGD versus wavelength.....	101
Figure E5 – DGD in histogram format	103
Figure F1 – Block diagram for Method F (polarization phase shift method).....	107
Figure F2 – DGD versus wavelength for a random mode coupling device	115
Table E1 – Example of Mueller set.....	99

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**PROCÉDURES D'ESSAI DES SOUS-SYSTÈMES
DE TÉLÉCOMMUNICATION À FIBRES OPTIQUES –**

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

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI 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, la CEI – 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 la CEI"). 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 la CEI, participent également aux travaux. La CEI 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 la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les publications CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et elles sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI 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 la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toute divergence entre toute Publication de la CEI et toute publication nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 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 la CEI, 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 la CEI, 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 la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, 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 CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété ou de ne pas avoir signalé leur existence.

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

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
86C/683/FDIS	86C/695/RVD

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

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

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

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

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

FDIS	Report on voting
86C/683/FDIS	86C/695RVD

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.

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

La CEI 61280 comprend les parties suivantes, sous le titre général *Procédures d'essai des sous-systèmes de télécommunication à fibres optiques*¹⁾:

Partie 1: Sous-systèmes généraux de télécommunication ²⁾

Partie 2: Systèmes numériques ³⁾

Partie 4: Installation de câbles et liens ⁴⁾

La Partie 3 est en préparation.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date du résultat de la maintenance indiquée sur le site web de la CEI à l'adresse suivante: "<http://webstore.iec.ch>", dans les données liées à la publication spécifique. A cette date, la publication sera

- reconduite;
- supprimée;
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

1) Le titre général de la série CEI 61280 a changé. D'autres parties ont été publiées dans le passé sous le titre général *Procédures d'essai de base des sous-systèmes de télécommunication à fibres optiques*

2) Le titre de la Partie 1 a changé. Les Parties 1–1 et 1–3 ont été publiées sous le titre *Procédures d'essai des sous-systèmes généraux de télécommunication*.

3) Le titre de la Partie 2 a changé. Les Parties 2–1, 2–2, 2–4 et 2–5 ont été publiées sous le titre *Procédures d'essai des systèmes numériques*.

4) Le titre de la Partie 4 a changé. La Partie 4–2 a été publiée sous le titre *Installation de câbles à fibres optiques*.

IEC 61280 consists of the following parts under the general title *Fibre optic communication subsystem test procedures* ¹⁾:

Part 1: General communication subsystems ²⁾

Part 2: Digital systems ³⁾

Part 4: Cable plant and links ⁴⁾

Part 3 is in preparation.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the maintenance result 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.

1) The general title of the IEC 61280 series has changed. Previous parts were published under the general title *Fibre optic communication subsystem basic test procedures*

2) The title of Part 1 has changed. Parts 1-1 and 1-3 were published under the title *Test procedures for general communication subsystems*.

3) The title of Part 2 has changed. Parts 2-1, 2-2, 2-4 and 2-5 were published under the title *Test procedures for digital systems*.

4) The title of Part 4 has changed. Part 4-2 was published under the title *Fibre optic cable plant*.

PROCÉDURES D'ESSAI DES SOUS-SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION À FIBRES OPTIQUES –

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

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61280 fournit des méthodes uniformes de mesure de la dispersion de mode de polarisation (PMD) de liaisons unimodales installées. Une liaison installée est le chemin optique entre l'émetteur et le récepteur ou une partie de ce chemin optique. Ces mesures peuvent être utilisées afin d'évaluer si une liaison donnée est adaptée à des applications à débit binaire élevé ou pour connaître les relations entre différents attributs d'une transmission. Les principes du présent document correspondent à ceux de la méthode d'essai des fibres optiques et des câbles à fibre optique, CEI 60793-1-48 (voir Bibliographie), qui porte sur les aspects de la mesure des longueurs de fabrication. Toutefois, le présent document porte sur les méthodes de mesure et les exigences relatives à la mesure de grandes longueurs qui peuvent être installées, et qui peuvent également inclure d'autres éléments optiques, par exemple des amplificateurs, des composants DWDM, des multiplexeurs, etc.

La PMD est un paramètre statistique. La reproductibilité des mesures dépend de la méthode choisie, mais elle est également limitée par le niveau de la PMD de la liaison. Gisin [3]⁵⁾ a établi une limite de reproductibilité théorique en considérant l'hypothèse d'une plage infinie de longueurs d'onde mesurées et de conditions de mesure idéales.

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

NOTE 2 Des méthodes d'essai relatives aux amplificateurs optiques sont données dans la CEI 61290-11-1 et dans la CEI 61290-11-2.

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

NOTE 4 La CEI 61282-3 contient des directives relatives au calcul de la PMD pour des liaisons comprenant des composants tels que des compensateurs de dispersion ou des amplificateurs optiques.

À l'exception de la méthode D, toutes les méthodes décrites dans le présent document peuvent être utilisées pour mesurer la dispersion de mode de polarisation (PMD) dans la bande de gain de liaisons incluant des amplificateurs optiques par pompage. Pour ces liaisons, le bruit de l'émission spontanée amplifiée (ASE) peut générer une énergie spectrale dépolarisée au voisinage de la longueur d'onde de mesure. En général ceci réduit la précision de la mesure. Pour les méthodes A, B, C, E et F, cet effet peut être modéré en installant un filtre optique ou électrique au niveau de l'extrémité du récepteur. Toutefois, un filtre optique ne supprimera pas l'ASE juste sous le spectre du signal. La précision sera alors limitée par le faible degré de polarisation (DOP), s'il n'est pas possible de réduire suffisamment la largeur spectrale du filtre comme c'est le cas avec une source à large bande. Un degré de polarisation (DOP) plus faible est significatif si l'intégration du signal est plus longue ou le résultat devient trop bruité et l'interprétation est erronée.

Aucune méthode ne convient à la mesure de la PMD de liaisons présentant une perte dépendant de la polarisation (PDL) supérieure à 10 dB. On obtient une précision raisonnable pour les liaisons dont les valeurs de la PDL sont inférieures à 1 dB. La précision de mesure peut être compromise par une PDL supérieure à 1 dB.

⁵⁾ Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

FIBRE OPTIC COMMUNICATION SUBSYSTEM TEST PROCEDURES –

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

1 Scope

This part of IEC 61280 provides uniform methods of measuring polarization mode dispersion (PMD) of single-mode installed links. An installed link is the optical path between transmitter and receiver, or a portion of that optical path. These measurements may be used to assess the suitability of a given link for high bit rate applications or to provide insight on the relationships of various related transmission attributes. The principles of this document are aligned with those of the optical fibre and optical fibre cable test method, IEC 60793-1-48 (see Bibliography), which focuses on aspects related to the measurement of factory lengths. Instead, this document focuses on the measurement methods and requirements for measuring long lengths that might be installed – and that might also include other optical elements, such as amplifiers, DWDM components, multiplexers, etc.

PMD is a statistical parameter. The reproducibility of measurements depends on the particular method, but is limited also by the PMD level of the link. Gisin [3]⁵⁾ derived a theoretical limit to this reproducibility, by assuming an infinite range of measured wavelengths and ideal measurement conditions.

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

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

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

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

With the exception of Method D, all methods in this document may be used to measure the PMD in the gain band of links that include pumped optical amplifiers. For these links, amplified spontaneous emission (ASE) noise can generate depolarized spectral energy in the neighbourhood of the measurement wavelength. This will, in general, reduce the accuracy of the measurement. For Methods A, B, C, E and F, this effect can be moderated by implementing an optical or electrical filter at the receive end. However, optical filtering will not remove the ASE right under the signal spectrum. The accuracy will then be limited by a lower degree of polarization (DOP), if the spectral width of the filter cannot be sufficiently reduced as with a broadband source. Lower DOP may require the signal to be integrated longer to be meaningful or the result will become too noisy and interpretation will be erroneous.

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

⁵⁾ Figures in square brackets refer to the bibliography.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence (y compris les éventuels amendements) s'applique.

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

3 Symboles et abréviations

c	Vitesse de la lumière dans le vide (299 792 458 m/s)
h	Longueur de couplage
L	Longueur de la liaison
t_c	Temps de cohérence de source optique (Méthode C)
$\delta\lambda$	Incrément (taille d'échelon) de longueur d'onde
$\delta\nu$	Incrément (taille d'échelon) de fréquence optique
$\Delta\lambda$	Largeur de raie ou largeur spectrale de la source optique (largeur à mi-hauteur (FWHM) sauf spécification contraire)
$\Delta\theta$	Angle de rotation sur la sphère de Poincaré
$\delta\tau$	Temps d'arrivée différents de différentes composantes de polarisation
$\delta\tau_{\min}$	Valeur $\delta\tau$ minimale pouvant être mesurée
$\Delta\tau$	Valeur du retard de groupe différentiel
$\langle\Delta\tau\rangle$	Retard de groupe différentiel (DGD) moyen sur une plage de longueurs d'onde ou valeur de PMD_{average}
$\langle\Delta\tau^2\rangle^{1/2}$	Moyenne quadratique (RMS) du retard de groupe différentiel (DGD) sur une plage de longueurs d'onde ou valeur de PMD_{RMS}
$\Delta\tau_{\max}$	Valeur $\delta\tau$ maximale pouvant être mesurée
$\Delta\omega$	Variation de fréquence angulaire dans la Méthode B
λ	Longueur d'onde d'essai utilisée pour mesurer la PMD
λ_0	Longueur d'onde centrale de la source de lumière
ν	Fréquence optique de la lumière
σ_R	Moment d'ordre 2 des données issues de la transformée de Fourier
σ_0	Largeur de la moyenne quadratique des carrés de l'enveloppe d'autocorrélation
σ_x	Largeur de la moyenne quadratique des carrés de l'enveloppe de corrélation croisée
σ_ε	Largeur de la moyenne quadratique de l'interférogramme
ω	Fréquence optique angulaire
ASE	Émission spontanée amplifiée
DGD	Retard de groupe différentiel
DOP	Degré de polarisation
DUT	Dispositif en essai
FA	Analyseur fixe

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

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

3 Symbols and abbreviated terms

c	Velocity of light in vacuum (299792458 m/s)
h	Coupling length
L	Length of the link
t_c	Optical source coherence time (Method C)
$\delta\lambda$	Wavelength increment (step size)
$\delta\nu$	Optical frequency increment (step size)
$\Delta\lambda$	Optical source spectral width or linewidth (FWHM unless noted otherwise)
$\Delta\theta$	Rotation angle on Poincaré sphere
$\delta\tau$	Differential arrival times of different polarization components.
$\delta\tau_{\min}$	Minimum $\delta\tau$ value that can be measured
$\Delta\tau$	Differential group delay value
$\langle\Delta\tau\rangle$	Average DGD over a wavelength range or PMD_{average} value
$\langle\Delta\tau^2\rangle^{1/2}$	RMS DGD over a wavelength range or PMD_{RMS} value
$\Delta\tau_{\max}$	Maximum $\delta\tau$ value that can be measured
$\Delta\omega$	Angular frequency variation in Method B
λ	Test wavelength used to measure PMD
λ_0	Central wavelength of the light source
ν	Optical light frequency
σ_R	Second moment of Fourier transform data
σ_0	RMS width of the squared autocorrelation envelope
σ_x	RMS width of the squared cross-correlation envelope
σ_ε	RMS width of interferogram
ω	Angular optical frequency
ASE	Amplified spontaneous emission
DGD	Differential group delay
DOP	Degree of polarization
DUT	Device under test
FA	Fixed analyzer

FET	Transistor à effet de champ
FWHM	Largeur à mi-hauteur
GINTY	Analyse interférométrique générale
E/S	Entrée-sortie
JME	Analyse des valeurs propres de la matrice de Jones
DEL	Diode électroluminescente
MPS	Déphasage par modulation
PDL	Perte dépendant de la polarisation
PIN (diode)	Diode à dopage P, Intrinsèque et dopage N
PMD	Dispersion de mode de polarisation
PPS	Déphasage par polarisation
PSA	Analyse de la sphère de Poincaré
PSP	État de polarisation principal
RBW	Largeur de bande de résolution
RMS	Moyenne quadratique
SOP	État de polarisation
SPE	Évaluation des paramètres de Stokes
TINTY	Analyse interférométrique traditionnelle

4 Propriétés de la dispersion en mode de polarisation: présentation générale

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

Pour des grandes longueurs de fibres, le retard de groupe différentiel (DGD) varie de manière aléatoire tant dans le domaine temporel que dans le domaine spectral, dans la mesure où il dépend des détails de la biréfringence sur toute la longueur de la fibre. Il est également sensible aux variations de température et aux perturbations mécaniques le long de la fibre. Pour cette raison, une façon utile de caractériser la PMD des fibres de grande longueur est de le faire en terme de valeur attendue, $\langle\Delta\tau\rangle$, c'est-à-dire le retard de groupe différentiel (DGD) moyen sur toute la longueur d'onde. En principe, la valeur attendue $\langle\Delta\tau\rangle$ 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, $\langle\Delta\tau\rangle$ est un moyen de prévision utile des qualités de fonctionnement des systèmes optiques.

Le terme «PMD» est utilisé à la fois dans un sens général désignant deux modes de polarisation ayant des vitesses de groupes différentes (un ayant la vitesse la plus élevée et correspondant au temps d'arrivée le plus précoce, l'autre ayant la vitesse la plus faible et correspondant au temps d'arrivée le plus tardif, la différence entre les deux temps d'arrivée étant le retard de groupe différentiel (DGD)), et dans le sens spécifique de la valeur attendue $\langle\Delta\tau\rangle$. Ce dernier définit la PMD dans le cadre de ce document. Le retard de groupe différentiel (DGD), $\Delta\tau$ ou l'élargissement d'impulsion, $\delta\tau$ peuvent faire l'objet d'une moyenne sur la longueur d'onde, conduisant à $\langle\Delta\tau\rangle_\lambda$, sur la fréquence, conduisant à $\langle\Delta\tau\rangle_\nu$ ou sur la

FET	Field effect transistor
FWHM	Full-width half-maximum
GINTY	General interferometric analysis
I/O	Input-output
JME	Jones matrix eigenanalysis
LED	Light emitting diode
MPS	Modulation phase shift
PDL	Polarization dependent loss
PIN (diode)	Positive insulated negative
PMD	Polarization mode dispersion
PPS	Polarization phase shift
PSA	Poincaré sphere analysis
PSP	Principal SOP
RBW	Resolution bandwidth
RMS	Root mean-square
SOP	State of polarization
SPE	Stokes parameter evaluation
TINTY	Traditional interferometric analysis

4 Background on PMD properties

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

In long fibre spans, DGD varies randomly both in time and wavelength since it depends on the details of the birefringence along the entire fibre length. It is also sensitive to time-dependent temperature and mechanical perturbations on the fibre. For this reason, a useful way to characterize PMD in long fibres is in terms of the expected value, $\langle\Delta\tau\rangle$, or the mean DGD over wavelength. In principle, the expected value $\langle\Delta\tau\rangle$ 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, $\langle\Delta\tau\rangle$ is a useful predictor of transmission performance.

The term "PMD" is used both in the general sense of two polarization modes having different group velocities (one having the fastest velocity and corresponding earliest arrival time and the other the slowest velocity and corresponding latest arrival time, the difference between the two arrival times being the DGD), and in the specific sense of the expected value $\langle\Delta\tau\rangle$. The latter gives us the strict definition of PMD for the purposes of this document. The DGD $\Delta\tau$ or pulse broadening $\delta\tau$ can be averaged over wavelength, yielding $\langle\Delta\tau\rangle_\lambda$, or frequency,

durée, conduisant à $\langle \Delta \tau \rangle_t$, ou sur la température, conduisant à $\langle \Delta \tau \rangle_T$. Dans la plupart des cas, il n'est pas nécessaire de faire la distinction entre ces différentes options pour obtenir $\langle \Delta \tau \rangle$.

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

On appelle parfois l'expression de l'équation (1a) la moyenne linéaire des valeurs du retard de groupe différentiel (DGD). Elle est utilisée pour spécifier des câbles à fibres optiques et d'autres composants. La moyenne quadratique des valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) est également donnée par certains instruments de mesure, en particulier ceux qui utilisent la Méthode C. Elle est définie par:

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

Pour de nombreuses liaisons, les valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) suivent une distribution aléatoire proche de la distribution de Maxwell. En supposant que les valeurs correspondent exactement à la distribution Maxwell, la valeur moyenne linéaire du retard de groupe différentiel (DGD) et la valeur moyenne quadratique du retard de groupe différentiel (DGD) satisfont l'équation (1c).

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

NOTE L'équation (1c) s'applique si la distribution des valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) est Maxwellienne. Cette hypothèse peut être fautive en présence d'éléments hautement biréfringents (par rapport au reste de la liaison) dans le chemin optique. On applique un multiplicateur de 3 à 3,7 (voir la CEI 61282-3), en fonction des limites de probabilité acceptées par le propriétaire de la liaison, à la valeur PMD_{AVG} pour déterminer le retard de groupe différentiel (DGD) maximal, qui est spécifié pour les liaisons conformes aux normes UIT-T. Ce multiplicateur est basé sur une hypothèse de Maxwell et reflète une longue queue de cette distribution. Si la liaison comporte un élément hautement biréfringent, la valeur PMD_{AVG} et la valeur PMD_{RMS} augmenteront toutes les deux par rapport à la queue réelle de la distribution du retard de groupe différentiel (DGD) (ce qui signifie qu'un multiplicateur réduit peut être utilisé), mais l'équation (1c) ne peut pas être maintenue parce que la distribution du retard de groupe différentiel (DGD) commence à ressembler à une distribution basée sur la racine carrée d'une distribution du khi carré non-centrale avec 3 degrés de liberté. Dans ces cas, la valeur PMD_{RMS} est généralement plus large que la valeur PMD_{AVG} donnée par l'équation (1c). Cette condition est représentée par des enveloppes des franges à «sommets plats» à partir des méthodes de mesure dans le domaine temporel comme dans la Méthode C et par des distributions retard de groupe différentiel (DGD) bimodales à partir des méthodes de mesure dans le domaine fréquentiel comme dans la Méthode B.

L'opérateur de valeur attendue dans les équations ci-dessus se rapporte à la valeur attendue à long terme sur toutes les longueurs d'onde. Dans la pratique, une plage de longueurs d'onde finie pour une condition et un instant particulier est échantillonnée et une moyenne des données est calculée. La valeur attendue de ces moyennes calculées est égale aux valeurs attendues à long terme, en supposant une ergodicité sur le temps, les longueurs d'onde et les conditions. Si cette hypothèse est fautive, le résultat dépendra des longueurs d'onde échantillonnées. Dans le cas d'un processus ergodique, la reproductibilité de la mesure dépendra de la plage de longueurs d'onde et du niveau de la PMD [3].

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

5 Méthodes de mesure

5.1 Méthodes de mesure de la PMD

Six méthodes élémentaires de mesure de la PMD sont présentées. Des informations spécifiques à chaque méthode sont présentées dans les annexes normatives. Les méthodes sont indiquées ci-dessous dans leur ordre de présentation. Pour certaines méthodes, plusieurs approches sont également proposées pour analyser les résultats mesurés.

yielding $\langle \Delta \tau \rangle_v$, or time, yielding $\langle \Delta \tau \rangle_t$, or temperature, yielding $\langle \Delta \tau \rangle_T$. For most purposes, it is not necessary to distinguish between these various options for obtaining $\langle \Delta \tau \rangle$.

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

The expression in Equation (1a) is sometimes called the linear average of the DGD values. It is reported for the purposes of specifying optical fibre cables and many other components. Another metric, the RMS of the DGD values is also reported by some measurement instruments, particularly those based on Method C. It is defined as:

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

For many links, the DGD values are randomly distributed closely as a Maxwell distribution. Under the assumption of a perfect fit with a Maxwell distribution, the linkage between the two metrics, linear average DGD and RMS DGD is given by Equation (1c).

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

NOTE 1 Equation (1c) applies if the distribution of DGD values is Maxwellian. This assumption may not be valid if there are highly birefringent elements (relative to the rest of the link) in the optical path. A multiplier of from 3 to 3,7 (see IEC 61282-3), depending on probability limits accepted by the link owner, is applied to the PMD_{AVG} value to determine the maximum DGD, which is specified for ITU-T compliant links. This multiplier is based on a Maxwell assumption and reflects a very long tail of that distribution. If the link includes a highly birefringent element, both the PMD_{AVG} and PMD_{RMS} metrics will increase relative to the actual tail of the DGD distribution (implying that a reduced multiplier could be used), but Equation (1c) may not be maintained because the DGD distribution will begin to resemble one based on the square root of a non-central chi-square distribution with three degrees of freedom. In these cases, the PMD_{RMS} value will generally be larger relative to the PMD_{AVG} value indicated by Equation (1c). This condition is indicated by "flat tops" on the fringe envelopes from the time domain measurement methods such as Method C and by bimodal DGD distributions from the frequency domain measurement methods such as Method B.

The expected value operator in the above equations refers to the long term expected value across all wavelengths. In practice, a finite wavelength range at a particular point of time and condition are sampled and some form of mean of the data is calculated. The expected value of these calculated means is equal to the long-term expected values, assuming ergodicity over time, wavelength, and condition. If this assumption is not valid, the result will vary depending on the particular wavelengths that are sampled. For ergodic conditions, the reproducibility of the measurement will vary with wavelength range and PMD level [3]⁶⁾.

NOTE 2 Ergodic: of or relating to a process in which every sequence or sizable sample is equally representative of the whole.

5 Measurement methods

5.1 Methods of measuring PMD

Six basic methods of measuring PMD are given. Details specific to each are given in normative annexes. The methods are listed below in order of their introduction. For some methods, multiple approaches of analyzing the measured results are also provided.

⁶⁾ Figures in square brackets refer to the bibliography.

- Méthode A Analyseur fixe (FA)
 - Transformée de Fourier (FT)
- Méthode B Evaluation des paramètres de Stokes (SPE)
 - Analyse des valeurs propres de la matrice de Jones (JME)
 - Analyse de la sphère de Poincaré (PSA)
- Méthode C Interférométrie (INTY)
 - Analyse traditionnelle (TINTY)
 - Analyse générale (GINTY)
- Méthode D Evaluation des paramètres de Stokes utilisant la lumière rétro-réfléchie
 - Analyse des valeurs propres de la matrice de Jones (JME)
 - Analyse de la sphère de Poincaré (PSA)
- Méthode E Déphasage modulé
 - Recherche complète
 - Analyse de l'ensemble de Mueller
- Méthode F Déphasage par polarisation (PPS)

Chaque méthode présente des avantages et des désavantages. Par exemple:

Les méthodes A, B, D, E et F peuvent être basées sur des mesures pouvant être interrompues si la liaison vibre, comme c'est le cas, par exemple, avec les câbles aériens si les propriétés optiques de la fibre varient pendant la période de mesure des données pour le calcul de chaque valeur du retard de groupe différentiel (DGD). Des taux de mesure rapides ont été mis en œuvre dans certains systèmes d'essai du domaine commercial pour réduire cet effet. La méthode C peut être utilisée dans ce cas, en raison de sa source à large bande et de l'interférométrie, pour déduire la PMD de l'enveloppe de la corrélation croisée dans le domaine temporel de l'interférogramme mesuré.

Les méthodes B, E et F nécessitent une communication et une coordination entre les sources et les extrémités de réception pendant une mesure. Pour cela, une voie de communication supplémentaire est nécessaire lorsque les extrémités des liaisons ne sont pas situées au même endroit. La liaison peut également être utilisée pour cette voie. En utilisant la méthode D, tous les équipements de mesure sont situés au même endroit, que les extrémités des liaisons soient situées au même endroit ou non, mais les deux extrémités d'une fibre doivent être préparées avec soin. Dans le cas des méthodes A et C, la source et le récepteur peuvent nécessiter d'être séparés, mais une coordination active de la source et du récepteur n'est pas nécessaire pendant une mesure.

La méthode E peut donner des résultats du retard de groupe différentiel (DGD) pour la largeur de bande optique occupée la plus proche, mais le retard de groupe différentiel (DGD) de la liaison doit être supérieur à environ 0,5 ps. L'exigence relative aux méthodes B, D et F est supérieure à celle de la méthode E parce qu'une différenciation numérique des données de sortie collectées pour deux longueurs d'onde proches est nécessaire, mais ces méthodes permettent de mesurer le retard de groupe différentiel (DGD) au plus petit des niveaux. La méthode C ne fournit pas de mesure de chaque valeur du retard de groupe différentiel (DGD), mais elle fournit la moyenne quadratique du retard de groupe différentiel (DGD) (PMD_{RMS}) sur les longueurs d'onde du spectre de la source.

La méthode F est similaire à la méthode E lorsque la méthode E est mise en œuvre par l'approche des matrices de Mueller. Toutefois, dans le cadre de la méthode F, des mesures doivent être faites à deux longueurs d'onde adjacentes afin d'obtenir une valeur du retard de groupe différentiel (DGD), de manière similaire aux méthodes B et D.

- Method A Fixed analyzer (FA)
 - Fourier transform (FT)
- Method B Stokes parameter evaluation (SPE)
 - Jones matrix eigenanalysis (JME)
 - Poincaré sphere analysis (PSA)
- Method C Interferometry (INTY)
 - Traditional analysis (TINTY)
 - General analysis (GINTY)
- Method D Stokes parameter evaluation using back-reflected light
 - Jones matrix eigenanalysis (JME)
 - Poincaré sphere analysis (PSA)
- Method E Modulated phase-shift
 - Full search
 - Mueller set analysis
- Method F Polarization phase shift (PPS)

Each method has advantages in certain respects and disadvantages in others. For example:

Methods A, B, D, E and F may rely on measurements that can be disrupted if the link is vibrating such as in the case of aerial cables if the optical properties of the fibre change within the time used to measure the data for calculating individual DGD values. Fast measurement rates have been implemented in some commercial field test systems to reduce this effect. Method C can be used in this case because it uses a broadband source and interferometry to deduce the PMD from the time-domain cross-correlation envelope of the measured interferogram.

Methods B, E and F require a communication and coordination between the sources and receive ends during a measurement, requiring an additional communication channel when the link ends are not co-located. The link itself may also be used for this channel. Using Method D, all measurement equipment is co-located whether or not the links ends are co-located, but special care shall be taken in the fibre end preparation at both ends. Using Method A and C, the source and receive equipment may have to be separated, but there is no need for active coordination of the source and receive equipment during the course of a measurement.

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

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

Toutes ces méthodes exigent des sources lumineuses contrôlées pour un ou plusieurs états de polarisation (SOP) connus et distincts. Toutes ces méthodes nécessitent l'injection de lumière dans un large domaine spectral afin d'obtenir une valeur de la PMD qui soit caractéristique de ce domaine (par exemple 1 300 nm ou 1 550 nm).

Les méthodes diffèrent sur les points suivants:

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

La méthode A n'a besoin que d'un état de polarisation (SOP) en entrée et utilise un analyseur fixe pour suivre la variation relative de la puissance d'un élément des vecteurs de Stokes. Lorsqu'une transformée de Fourier est appliquée à ces données, le résultat est un demi-interférogramme virtuel, qui est évalué d'une manière similaire à la méthode C (TINTY).

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

La variation de ces vecteurs de Stokes en fonction de la fréquence angulaire (longueur d'onde) ω et en fonction de la variation de l'état de polarisation (SOP) en 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:

$$\frac{d\hat{s}(\omega)}{d\omega} = \hat{\Omega}(\omega) \times \hat{s}(\omega) \quad (2)$$

$$\Delta\tau(\omega) = \left| \hat{\Omega}(\omega) \right| \quad (3)$$

où

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

$\hat{\Omega}$ est le vecteur des états de polarisation principaux, que l'on appelle également le vecteur de dispersion de polarisation (PDV) à la fréquence optique angulaire ω

$\Delta\tau$ est le retard de groupe différentiel (DGD) à la fréquence optique angulaire ω

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

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

All methods require light sources that are controlled at one or more known and distinct states of polarization (SOP). All methods require injecting light across a spectral region to obtain a PMD value that is characteristic of that region (for example, 1 300 nm or 1 550 nm).

The methods differ in:

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

Method A requires only one input SOP and uses a fixed analyzer to track the relative change in power of one element of the Stokes vectors. When a Fourier transform is applied to this data, the result is a virtual half-interferogram, which is evaluated in a manner similar to Method C (TINTY).

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

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

$$\frac{d\hat{s}(\omega)}{d\omega} = \hat{\Omega}(\omega) \times \hat{s}(\omega) \quad (2)$$

$$\Delta\tau(\omega) = \left| \hat{\Omega}(\omega) \right| \quad (3)$$

where

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

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

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

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

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

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

En outre, dans le cas d'un système de mesure arithmique (par opposition à un système à balayage), la taille d'échelon de la source à bande étroite doit être sélectionnée avec soin en fonction du spectre du retard de groupe différentiel (DGD) attendu (variation du retard de groupe différentiel (DGD) en fonction de la longueur d'onde). Se reporter à l'Article B.2 pour obtenir plus de détails sur la sélection de la taille d'échelon. La largeur de raie de la source à bande étroite doit ensuite être ajustée à la taille d'échelon sélectionnée conformément au critère de Nyquist.

La Méthode C est basée sur une source de lumière à large bande qui est polarisée pour un ou plusieurs états de polarisation (SOP) distincts et connus. La corrélation croisée du champ électromagnétique émergent est déterminée par le diagramme d'interférence de la lumière en sortie. La caractérisation de ce diagramme est effectuée en calculant la largeur de la moyenne quadratique de l'enveloppe de la corrélation croisée de l'interférogramme pour la méthode TINTY ou les largeurs des moyennes quadratiques des carrés de l'enveloppe de l'autocorrélation et de l'enveloppe de la corrélation croisée de l'interférogramme pour la méthode GINTY. Ces largeurs de moyennes quadratiques donnent la valeur de la PMD pour la plage de longueurs d'onde associées au spectre de la source (la largeur de bande de la source). La précision de la méthode C (TINTY) peut être réduite pour les liaisons contenant des amplificateurs, ce qui peut limiter le spectre de la source. Ce n'est pas le cas pour la méthode GINTY. En outre, la méthode TINTY peut être appliquée dans le cadre d'un ensemble d'exigences rigoureuses auxquelles la méthode GINTY n'est pas soumise. La méthode C mesure uniquement la valeur PMD_{RMS} .

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

La méthode E mesure la différence de phase entre deux états de polarisation (SOP) d'entrée ou plus pour une source de lumière à bande étroite modulée. Dans le cadre de la technique de recherche complète, il est nécessaire d'injecter une paire alternative d'états de polarisation (SOP) d'entrée orthogonaux pour obtenir un déphasage donné. On fait varier l'axe de cette paire sur l'ensemble de la sphère de Poincaré afin d'obtenir le déphasage maximal. La différence de déphasage maximale trouvée est utilisée pour déduire le retard de groupe différentiel (DGD) au niveau de la longueur d'onde centrale du spectre de la source. La technique de l'ensemble de Mueller [1] nécessite l'injection de quatre états de polarisation (SOP) par longueur d'onde (spectre de la source), qui représente l'ensemble de Mueller. L'analyse des déphasages associés à ces états de polarisation (SOP) donne une valeur du retard de groupe différentiel (DGD) pour la longueur d'onde. Lorsque la mesure est faite pour un certain nombre de longueurs d'onde dans une plage de longueurs d'onde, la moyenne des valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) donne la valeur de la PMD pour cette plage.

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

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

Method C is based on a broadband light source that is polarized at one or more known and distinct SOPs. The cross-correlation of the emerging electromagnetic field is determined by the interference pattern of the output light. The characterization of this pattern is done by computing the RMS width of the cross-correlation envelope of the interferogram for TINTY or the squared RMS widths of both the cross-correlation and autocorrelation envelopes of the interferogram for GINTY. These RMS widths yield the PMD value for the wavelength range associated with the source spectrum (the source bandwidth). The accuracy of Method C (TINTY) may be reduced for links containing amplifiers, which may limit the source spectrum. This is not the case for GINTY. Furthermore, TINTY is applicable upon a set of stringent requirements that GINTY is not subjected to. Method C measures the PMD_{RMS} value only.

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

Method E measures the phase difference between two or more input SOPs for a modulated narrowband light source. The full search technique requires launching an alternating pair of orthogonal input SOPs to obtain a given phase shift. The axis of this pair is varied across the entire Poincaré sphere to obtain the maximum phase shift. The maximum phase shift difference that is found is used to deduce the DGD at the centre wavelength of the source spectrum. The Mueller set technique [1] requires launching four SOPs per wavelength (source spectrum), representing a Mueller set. Analysis of the phase shifts associated with these SOPs yields a DGD value for the wavelength. When the measurement is conducted for a number of wavelengths in a wavelength range, the average of the DGD values yields the PMD value for that range.

La méthode F mesure les différences de phase entre différents états de polarisation (SOP) connus et distincts tels que les états de polarisation (SOP) en entrée linéaires et orthogonaux, comme c'est le cas pour la méthode E. Sa seule différence avec la méthode E est que seuls deux états de polarisation (SOP) en entrée orthogonaux sont nécessaires. Ainsi, des résultats pour deux longueurs d'onde sont nécessaires pour calculer une seule valeur de retard de groupe différentiel (DGD).

Des informations communes aux six méthodes sont fournies aux Articles 1 à 8, et des exigences relatives à chaque méthode individuelle figurent, respectivement, dans les Annexes A, B, C, D, E et F.

5.2 Méthode d'essai de référence

Il n'y a pas de méthode d'essai de référence parce que chaque méthode possède ses propres applications optimales.

6 Appareillage

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

Tous les éléments de transmission de l'appareillage peuvent avoir un effet sur la PMD mesurée. Les éléments sélectionnés doivent présenter des valeurs maximales de retard de groupe différentiel (DGD) et de perte dépendant de la polarisation (PDL) les plus petites possibles dans la plage spectrale de la mesure de la PMD. Il peut être nécessaire d'évaluer l'influence globale de ces éléments en effectuant une mesure sur une petite longueur (par exemple 2 m) d'une fibre présentant une faible PMD. Si l'influence de ces éléments sur la PMD est importante, une possibilité consiste à soustraire, en quadrature, la valeur de la PMD du système de mesure de la valeur de la PMD de la liaison mesurée avant de déterminer la valeur finale.

6.1 Source de lumière et polariseurs

Se reporter aux Annexes A, B, C, D, E et F pour les choix détaillés des caractéristiques spectrales de la source de lumière. 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 et elle devrait couvrir la plage de longueurs d'onde requise pour déterminer la PMD pour la bande en question.

Pour toutes les méthodes, il est nécessaire que la source de lumière soit polarisée pour un ou plusieurs états de polarisation (SOP) avant d'être injectée dans la fibre en essai. Il est possible d'utiliser des polariseurs, des dispositifs de réglage de la polarisation qui utilisent des lames à longueur d'onde, des lames à retard à cristaux liquides, des boucles de fibres biréfringentes déplacées mécaniquement ou des dispositifs à cristaux électro-optiques pour régler l'état de polarisation (SOP) de la source au niveau de l'entrée de la fibre en essai et l'axe de polarisation de l'analyseur au niveau de la sortie de la fibre en essai. Il est possible de vérifier les performances du montage du dispositif de réglage de la polarisation en mesurant la puissance de sortie pour les trois états de polarisation (SOP) linéaires connus et distincts. Si les puissances de sortie sont situées à 3 dB les unes des autres, le montage du dispositif de réglage de la polarisation est convenable.

Pour les méthodes A, B, D (lorsqu'une source de lumière accordable à bande étroite est utilisée), E et F, la largeur spectrale effective (spectre gaussien, largeur à mi-hauteur) de la source $\Delta\lambda$ doit être suffisamment étroite pour que la lumière provenant de la fibre reste polarisée dans toutes les conditions de mesure et pour toutes les valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) mesurée. Un degré de polarisation (DOP) de 90 % ou plus est préférable,

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

Information common to all six methods is contained in Clauses 1 through 8, and requirements pertaining to each individual method appear in Annexes A, B, C, D, E and F, respectively.

5.2 Reference test method

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

6 Apparatus

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

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

6.1 Light source and polarizers

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

For all methods, the light source is required to be polarized at one or more known and distinct SOPs before it is injected into the fibre under test. Polarizers, polarization adjusters using waveplates, liquid crystal retardation plates, loops of birefringent fibre that are mechanically moved, or electro-optic crystal devices may be used to set the source SOP at the input of the fibre under test as well as the analyzer polarization axis at the output of the fibre under test. The performance of the polarization adjuster setup can be verified by measuring the output power at three linear known and distinct SOPs. If the output powers are within 3 dB of one another, the adjuster setup is suitable.

For Methods A, B, D (when implemented using a narrowband tuneable light source – TLS), E and F, the effective spectral width (Gaussian spectrum, full-width half-maximum – FWHM) of the source, $\Delta\lambda$, shall be narrow enough so that light emerging from the fibre remains polarized under all conditions of measurement and for all DGD values being measured. A DOP of 90 %

bien que des mesures puissent être effectuées avec des valeurs aussi faibles que 25 % avec une précision réduite. La relation entre le degré de polarisation (DOP), la largeur spectrale $\Delta\lambda$ le centre de la longueur d'onde, λ_0 et le retard de groupe différentiel (DGD), $\Delta\tau$, sont donnés par l'équation:

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

6.2 Optique d'entrée

Il est possible d'utiliser une fibre amorce connectorisée pour injecter la lumière dans la liaison. Le reste de l'optique d'entrée précède cette fibre amorce. La connexion doit être stable pendant toute la durée de la mesure.

Pour la méthode D, il existe des exigences spéciales sur l'interface de la fibre amorce du système de mesure et la liaison pour contrôler les réflexions (se reporter à l'Annexe D).

6.3 Extracteur de mode de gaine

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

6.4 Filtre de mode d'ordre élevé

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

6.5 Positionneur de sortie

Il est possible d'utiliser une fibre amorce connectorisée pour transposer la liaison vers l'optique de sortie. Cette connexion doit être stable pendant toute la durée de la mesure.

Pour la méthode D, la lumière réfléchiée par l'extrémité éloignée de la liaison (par rapport à la source de lumière) peut nécessiter une préparation spéciale de l'extrémité pour maximiser la réflexion. Pour cette méthode, la sortie de la connexion est la même que la connexion d'entrée.

6.6 Optique de sortie

Se reporter à l'Annexe appropriée (A, B, C, D, E ou F).

Dans certaines mesures de liaisons, il peut être nécessaire de combiner un amplificateur optique et un atténuateur dans le montage d'essai pour maintenir la puissance à un niveau correct pour le détecteur analyseur. Dans ce cas, un tel appareillage de réglage de la puissance est généralement placé juste avant le détecteur.

Pour la méthode D, l'optique de sortie est située au même endroit que l'optique d'entrée.

or greater is preferred, although measurements may be performed with values as low as 25 % with reduced precision. The relationship between DOP, the spectral width, $\Delta\lambda$, wavelength centre, λ_0 , and DGD, $\Delta\tau$, is given by:

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

6.2 Input optics

A connectorized fibre pigtail may be employed to launch the light into the link. The rest of the input optics precedes this pigtail. The connection shall be stable over the course of the measurement.

For Method D, there are special requirements on interface of measurement system pigtail and the link to control reflections (see Annex D).

6.3 Cladding mode stripper

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

6.4 High-order mode filter

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

6.5 Output positioner

A connectorized fibre pigtail may be employed to transmit the link to the output optics. This connection shall be stable over the course of the measurement.

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

6.6 Output optics

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

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

For Method D, the output optics are co-located with the input optics.

6.7 Détecteur

Pour la détection de signal, on utilise un détecteur optique linéaire et stable sur la gamme des intensités, des longueurs d'onde 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 wattmètre optique, un analyseur de spectre optique, un interféromètre ou un polarimètre. Pour utiliser l'ensemble de la gamme spectrale de la source, il faut que le système de détection ait une gamme de longueurs d'onde qui couvre les longueurs d'onde produites par la source de lumière. Pour plus de détails, se reporter à l'Annexe appropriée (A, B, C, D, E ou F) .

6.8 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.

6.9 Moyen pour réduire les phénomènes d'émission spontanée amplifiée

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

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

7 Échantillonnage et échantillons en essai

Un échantillon en essai est une longueur de liaison par fibre optique unimodale. À l'exception de la méthode C, il est recommandé de mesurer la liaison lorsque des vibrations ou des variations de température sont rendues minimales pendant la période de la mesure. Si la liaison comporte des amplificateurs optiques, il est recommandé de les mettre en marche.

8 Procédure

- a) Préparer les extrémités de la liaison en fixant le connecteur requis.

NOTE Pour la méthode D, il est nécessaire que l'extrémité d'entrée de la fibre soit oblique pour réduire les réflexions provenant de l'extrémité d'entrée.

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

NOTE Pour la méthode D, l'optique d'entrée et l'optique de sortie sont identiques et on appellera extrémité d'entrée l'extrémité de la liaison à laquelle elles sont attachées. L'extrémité de sortie de la liaison peut nécessiter une préparation spéciale pour garantir une réflexion adéquate vers l'extrémité d'entrée.

- c) Utiliser le calculateur pour effectuer les analyses et les mesures indiquées dans les Annexes A, B, C, D, E ou C pour les quatre méthodes de mesure.
- d) Remplir les documents.

9 Calcul ou interprétation des résultats

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

La CEI 61282-3 fournit des informations sur le calcul de la PMD de la liaison en se basant sur les statistiques des valeurs des composants et des fibres optiques.

6.7 Detector

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

6.8 Computer

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

6.9 Means to reduce the effects of amplified spontaneous emission

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

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

7 Sampling and specimens

A specimen is a length of single-mode optical fibre link. Except for Method C, the link should be measured at a time when vibrations or temperature variations are minimized over the time period of the measurement. If the link includes optical amplifiers, they should be turned on.

8 Procedure

- a) Prepare the ends of the link by attaching the required connector.

NOTE For Method D, an angled fibre end is required at the input to minimize reflections from the input end.

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

NOTE For Method D, the input and output optics are the same; the end of the link to which they are attached will be called the input end. The output end of the link may need special preparations to ensure an adequate reflection back to the input end.

- c) Engage the computer to complete the scans and measurements found in Annexes A, B, C, D, E or F for the four measurement methods.
- d) Complete documentation

9 Calculation or interpretation of results

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

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

10 Documentation

10.1 Informations requises pour chaque mesure

- Liaison
 - Identification
 - Description, par exemple la présence d'amplificateurs optiques ou d'autres composants
 - Longueur (km)
 - Types de câbles et de fibres
- Date de l'essai
- Résultats de l'essai
 - Valeur de la PMD comme PMD_{AVG} ou PMD_{RMS}
 - Spectre et largeur de raie de la source de lumière du montage d'essai
 - Le retard de groupe différentiel (DGD) en fonction des longueurs d'onde et/ou des fréquences pour les méthodes B, D, E, F
 - Interférogramme pour la méthode C
 - L'intensité en fonction des longueurs d'onde ou des fréquences et de la transformée de Fourier pour la méthode A
- Plage de fréquences ou de longueurs d'onde sur laquelle la mesure est effectuée

10.2 Informations nécessairement disponibles

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

- Montage d'essai
 - Méthode de mesure
 - Méthode de calcul (analyse)
 - Description des équipements
 - Caractéristiques détaillées de la source
 - Caractéristiques détaillées de l'analyseur
 - Autres accessoires utilisés
 - Étalonnage
 - Date du dernier étalonnage
 - Méthode d'étalonnage
 - Analyse de l'incertitude
- Pour les méthodes B, D et E, le nombre de longueurs d'onde échantillonnées
- Pour la méthode C, le type de détection des franges

11 Informations relatives à la spécification

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

10 Documentation

10.1 Information required for each measurement

- Link
 - Identification
 - Description, for example presence of optical amplifiers or other components
 - Length (km)
 - Fibre and cable types
- Testing date
- Test results
 - PMD value as PMD_{AVG} or PMD_{RMS}
 - Spectrum and linewidth of the test set-up light source
 - DGD as a function of wavelengths or/and frequencies for Methods B, D, E, F
 - Interferogram for Method C
 - Intensity as a function of wavelengths or frequencies and Fourier transform for Method A
- Wavelength or frequency range over which the measurement is performed

10.2 Information to be available

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

- Test set-up
 - Measurement method
 - Calculation approach (analysis)
 - Description of equipment
 - Source detailed characteristics
 - Analyzer detailed characteristics
 - Any other accessories if used
 - Calibration
 - Date of latest calibration
 - Method of calibration
 - Uncertainty analysis
- For Methods B, D and E, the number of wavelengths sampled
- For Method C, the type of fringe detection technique

11 Specification information

- Wavelength range
- Any deviations from this procedure

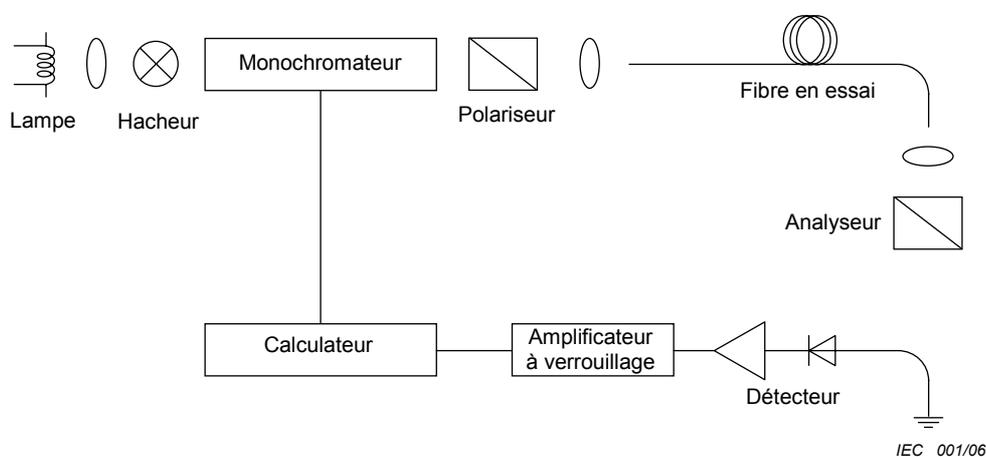
Annexe A (normative)

Méthode de l'analyseur fixe

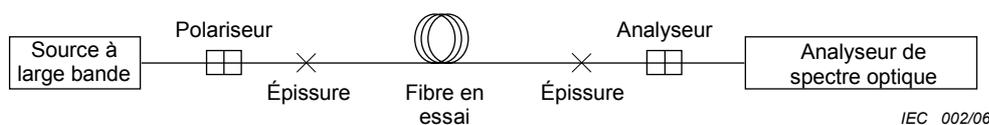
Cette annexe contient les exigences spécifiques à la méthode A, Méthode de mesure de l'analyseur fixe (FA).

A.1 Appareillage

La Figure A.1 illustre les schémas fonctionnels possibles.



(a) Montage utilisant une source à bande étroite basée sur une lampe et un monochromateur



(b) Montage utilisant une source à bande étroite

Figure A.1 – Schémas relatifs à l'analyseur fixe

A.1.1 Source lumineuse

Dans tous les cas, il est possible d'utiliser deux types de sources de lumière, selon le type d'analyseur. Il est possible d'utiliser une source à bande étroite telle que la combinaison d'une lampe à large bande et d'un monochromateur illustrée dans la Figure A.1(a) associée à un analyseur de polarisation. Il est possible d'utiliser la source à large bande illustrée dans la Figure A.1(b) avec un analyseur à filtre passe-bande étroit tel qu'un analyseur de spectre optique ou un interféromètre utilisé comme un analyseur de spectre par la transformée de Fourier placé avant l'analyseur. Dans le cas d'une source à large bande, on prendra comme largeur spectrale la largeur du filtre, pour les besoins des calculs.

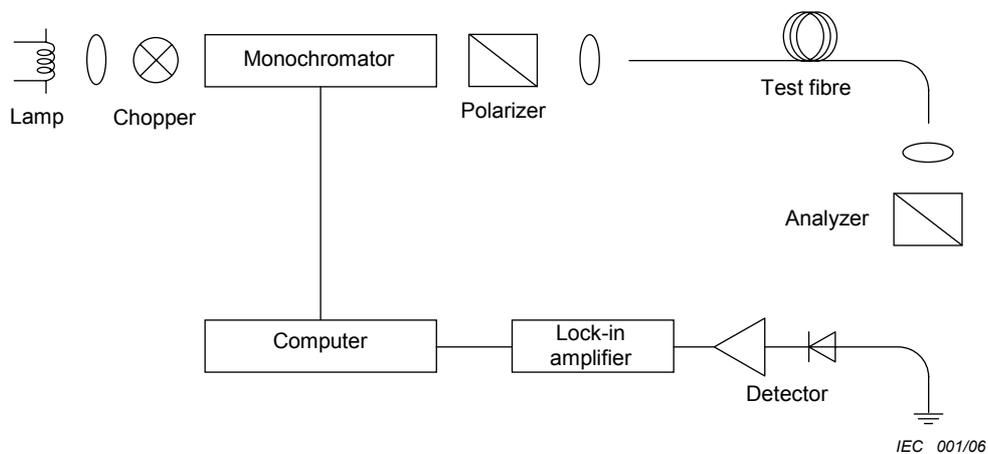
Annex A (normative)

Fixed analyzer method

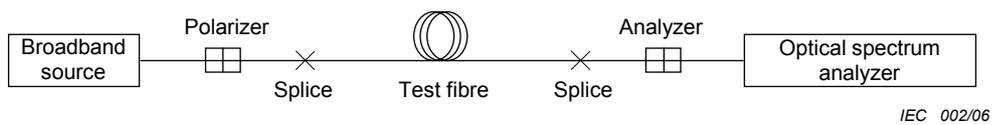
This annex contains requirements specific to Method A, fixed analyzer (FA) measurement method.

A.1 Apparatus

Figure A.1 shows possible block diagrams.



(a) Set-up using a narrowband source based on lamp and monochromator



(b) Set-up using a broadband source

Figure A.1 – Block diagrams for fixed analyzer

A.1.1 Light source

In all cases, two kinds of light sources may be used, depending on the type of analyzer. A narrowband source such as the broadband lamp and monochromator combination shown Figure A.1(a) can be used with a polarization analyzer. A broadband source shown in Figure A.1(b) can be used with a narrow bandpass filtering analyzer such as an optical spectrum analyzer or an interferometer used as a Fourier transform spectrum analyzer placed before the analyzer. In the case of broadband source, the width of the filter is taken as the spectral width for the purpose of calculations.

Dans les deux cas, la largeur spectrale doit être suffisamment faible pour maintenir le degré de polarisation (DOP) exigé (se reporter à 5.1), mais pas trop faible par rapport à la taille d'échelon sélectionnée pour éviter les phénomènes d'interférence cohérente inutiles et autres bruits parasites. Dans les deux cas, la gamme de longueurs d'ondes 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 A.3).

Pour que toutes les caractéristiques dans le spectre optique aient une résolution adéquate, il convient que la largeur spectrale soit comme suit:

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

où

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

$\Delta\lambda$ est la largeur spectrale et

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

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

A.1.2 Analyseur

L'orientation angulaire de l'analyseur n'est pas critique, mais il est souhaitable 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 fin de l'analyseur peut s'avérer utile pour maximiser l'amplitude des oscillations illustrées à la Figure A.2 – on peut également y parvenir par rotation de la fibre au niveau des épissures ou des connecteurs.

NOTE Il est possible de remplacer l'analyseur par un polarimètre.

A.2 Procédure

A.2.1 Gamme de longueurs d'onde et modification de longueur d'onde

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

Si la méthode de transformée de Fourier est utilisée, il convient que l'incrément en longueur d'onde soit uniforme dans le domaine fréquentiel optique et que le nombre d'échantillons soit une puissance de 2. La taille du pas du monochromateur, exprimée dans le domaine fréquentiel optique $\delta\nu$, doit être inférieure d'un facteur 2 à la «fréquence d'oscillation» correspondant au retard de groupe différentiel (DGD) maximal mesuré. En raison de la grande quantité de puissance à l'extérieur du moment d'ordre 2 pour les fibres à couplage de mode fort, la condition de Nyquist nécessite un incrément en fréquence inférieur à trois fois la fréquence de la largeur de la moyenne quadratique (moment d'ordre 2) associé au retard de groupe différentiel (DGD) maximal prévu. A savoir:

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

NOTE 1 Si, à partir de la transformée de Fourier, il semble 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.

NOTE 2 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.

In both cases, the spectral width shall be sufficiently small to maintain the desired DOP (see 5.1), but not too small compared to the selected step size to avoid unnecessary coherent interference effects and other spurious noises. In both cases, the range of wavelengths shall be sufficient to provide a PMD measurement of sufficient precision at the specified wavelength region (see A.3).

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

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

where

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

$\Delta\lambda$ is the spectral width, and

$\Delta\tau_{\max}$ 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.1.2 Analyzer

The angular orientation of the analyzer is not critical, but should remain fixed throughout the measurement. With negligible mode coupling or low PMD values, some adjustment of the analyzer may be helpful in maximizing the amplitude of the oscillations in Figure A.2 – which can also be achieved by rotating the fibre at splices or connectors.

NOTE The analyzer 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 increment once with the analyzer in the optical path and once without. The wavelength range can influence the precision of the result (see A.3). The wavelength increment should be selected to satisfy Equation (A.1), with the wavelength increment replacing $\Delta\lambda$.

If the Fourier transform method is used, the wavelength increment should ideally be uniform in optical frequency and the number of steps should be a power of 2. The monochromator step-size, expressed in optical frequency, $\delta\nu$, shall be a factor of two smaller than the “oscillation frequency” corresponding to the maximum DGD measured. Because of the large amount of power outside the second moment for highly mode-coupled fibres, the Nyquist condition requires a frequency increment smaller than three times the frequency of the RMS width (second moment) associated with the maximum anticipated DGD. That is:

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

NOTE 1 If from the Fourier transform, it is evident that there is significant energy near $\Delta\tau_{\max}$, the measurement should be repeated with a reduced increment.

NOTE 2 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 Balayages

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

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

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

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

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

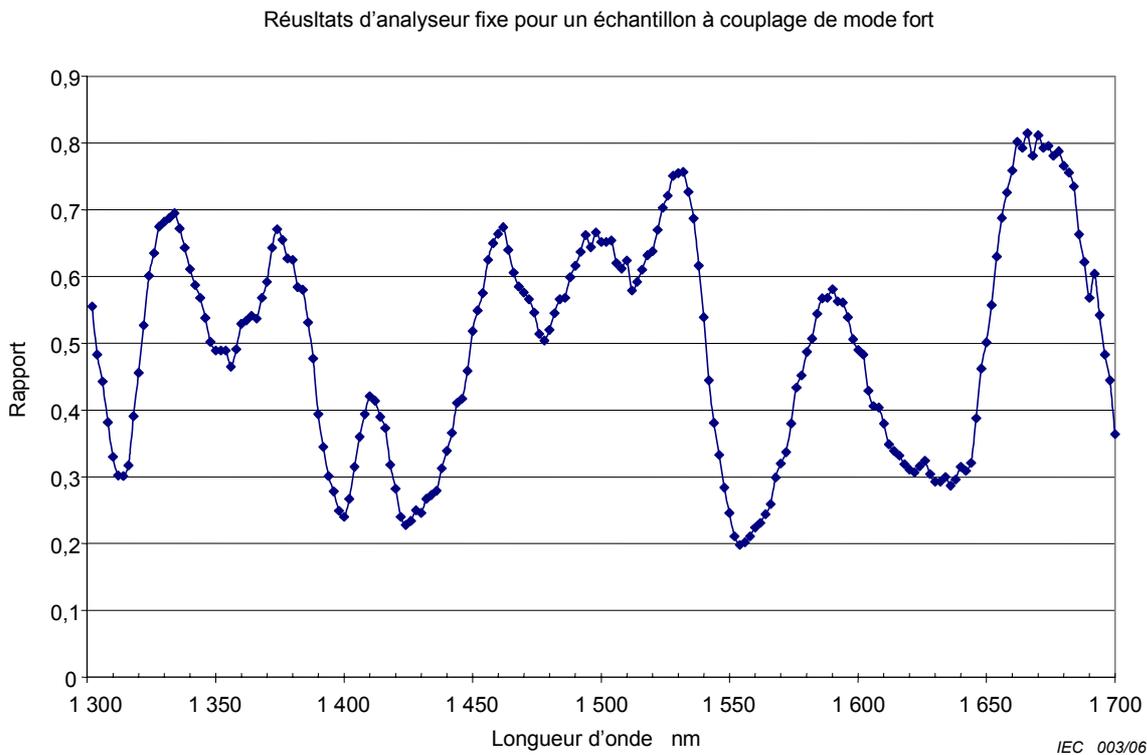


Figure A.2 – Exemple de fonction R pour la méthode à analyseur fixe

Il existe une autre procédure qui consiste à laisser l'analyseur en place lors du second balayage, 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:

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

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

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

A.2.2 Complete the scans

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

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

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

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

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

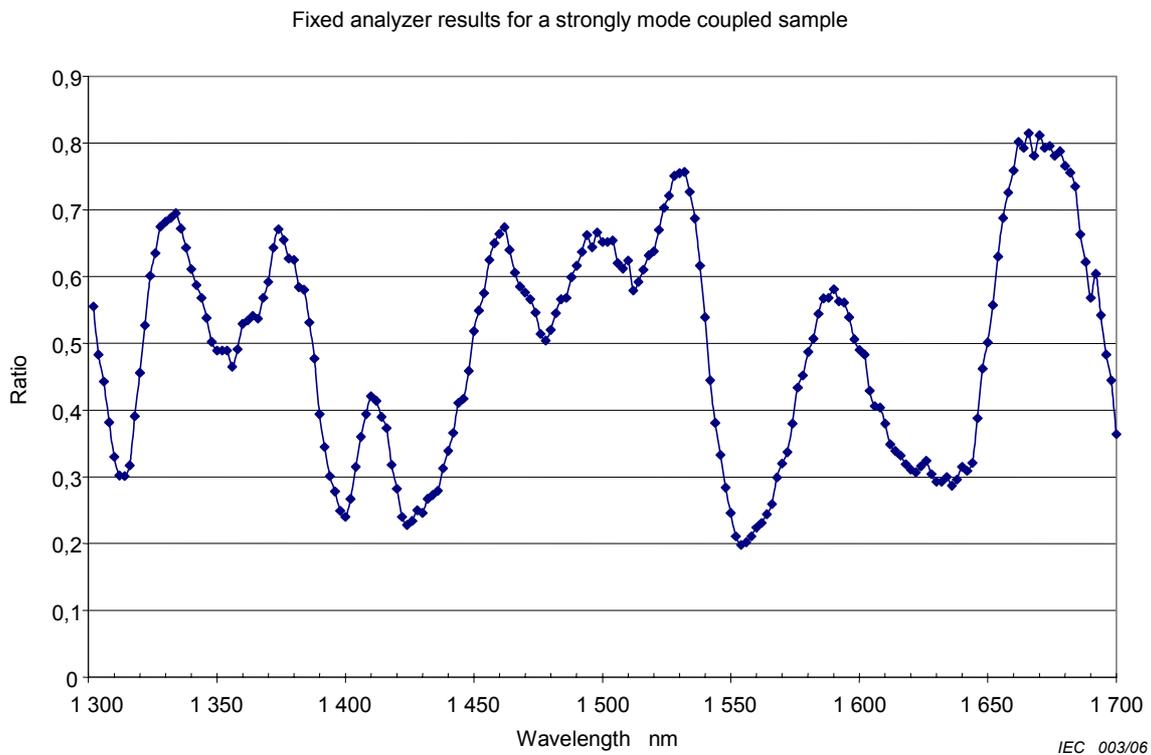


Figure A.2 – Example of the R-function for the fixed analyzer method

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

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

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

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

A.3 Calculs – Transformée de Fourier

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

A.3.1 Prétraitement des données et transformée de Fourier

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

Il est permis de procéder à une correction de 0 ou à l'interpolation de données et au retrait du niveau continu sur les données de rapport $R(\lambda)$. Le fenêtrage des données peut également être utilisé comme une étape de préconditionnement avant la transformée de Fourier. La transformée de Fourier est à ce point effectuée pour produire la distribution des données en amplitude $P(\delta\tau)$ pour chaque valeur de $\delta\tau$.

A.3.2 Adaptation des données de transformation

Les données issues de la transformée de Fourier à 0 $\delta\tau$ ont peu de signification dans la mesure où, sauf si elles ont été éliminées avec soin, les composantes continues de $R(\lambda)$ peuvent être dues en partie à la perte d'insertion de l'analyseur, par exemple. Lorsque le niveau continu n'est pas supprimé, jusqu'à 2 points de données sont généralement shuntés (non utilisés) dans tout calcul ultérieur. Une variable, j , peut être définie de manière à ce que le «premier bin valide» situé au-dessus de 0 $\delta\tau$ 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 qu'il faut que $P(\delta\tau)$ ait des caractéristiques d'impulsion discrètes qui sont typiques des fibres à couplage de mode négligeable. La valeur de X est égale à 3, sauf si une correction de 0 est utilisée dans l'analyse de Fourier. Dans ce cas, la valeur de X peut être déterminée à partir de

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

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

A.3 Calculations – Fourier transform

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

A.3.1 Data pre-processing & 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 transformation is now carried out, to yield the amplitude data distribution $P(\delta\tau)$ for each value of $\delta\tau$.

A.3.2 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 analyzer for example. When the “dc” level is not removed, up to two data points are generally bypassed (not used) in any further calculations. A variable, j , can be defined so that the ‘first valid bin’ above zero $\delta\tau$ that is included in calculations corresponds to $j = 0$.

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

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

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

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

A.3.2.1 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, tels que ceux utilisés pour l'étalonnage, $R(\lambda)$ ressemble à une onde modulée (voir 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 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.

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

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

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

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

A.3.2.2 Calcul de la dispersion de mode de polarisation (PMD) pour des fibres à couplage de mode aléatoire

Dans les exemples de couplage de mode aléatoire, $R(\lambda)$ devient une forme d'onde complexe similaire à celle illustrée dans 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 la transformée de Fourier deviennent maintenant une distribution $P(\delta\tau)$ représentant l'autocorrélation de la distribution de probabilité de temps d'arrivée d'impulsion lumineuse $\delta\tau$ dans la fibre (se reporter à la Figure A.3).

En comptant à partir de $j = 0$, on détermine le premier point de P qui dépasse T_1 , et qui est suivi d'au moins X points de données en dessous de T_1 . Ce point représente le dernier point significatif (c'est-à-dire «l'extrémité») de la 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 2 σ_R de cette distribution définit la $PMD_{\text{RMS}} \langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2}$ de la fibre et est donnée par:

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

Si l'on considère que le retard de groupe différentiel (DGD) suit une distribution de Maxwell, la relation entre la moyenne quadratique de la PMD et la PMD définie par la moyenne est donnée par

$$\langle \Delta\tau \rangle = \left(\frac{8}{3\pi} \right)^{1/2} \langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2} \tag{A.7b}$$

A.3.2.1 PMD calculation for fibres with negligible mode coupling

For a negligibly coupled fibre (e.g., a high birefringence fibre) or for a birefringent component, such as those used for calibration, $R(\lambda)$ resembles a chirped sine wave (Figure A.2a). Fourier transformation will give a $P(\delta\tau)$ output containing a discrete spike at a position corresponding to the relative pulse arrival time, $\delta\tau$, the centroid of which is the PMD value $\langle \Delta\tau \rangle$.

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.3.2.2 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 autocorrelation of the probability distribution 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_{RMS} $\langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2}$, and is given by:

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

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

$$\langle \Delta\tau \rangle = \left(\frac{8}{3\pi} \right)^{1/2} \langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2} \quad (\text{A.7b})$$

A.3.2.3 Calcul de la dispersion de mode de polarisation (PMD) pour des systèmes de fibres à couplage mélangé

Il peut y avoir des exemples où des fibres/composants à couplage négligeable et une ou plusieurs fibres à couplage aléatoire sont mis bout à bout pour former une liaison. Dans ce cas, il est possible que la détermination du centre (équation (A.6)) et la dérivation du moment d'ordre 2 (équation (A.7)) s'avèrent nécessaires. Noter que les transitoires dans $P(\delta\tau)$ ne peuvent être déterminées qu'au-delà du $\delta\tau_{last}$ calculé.

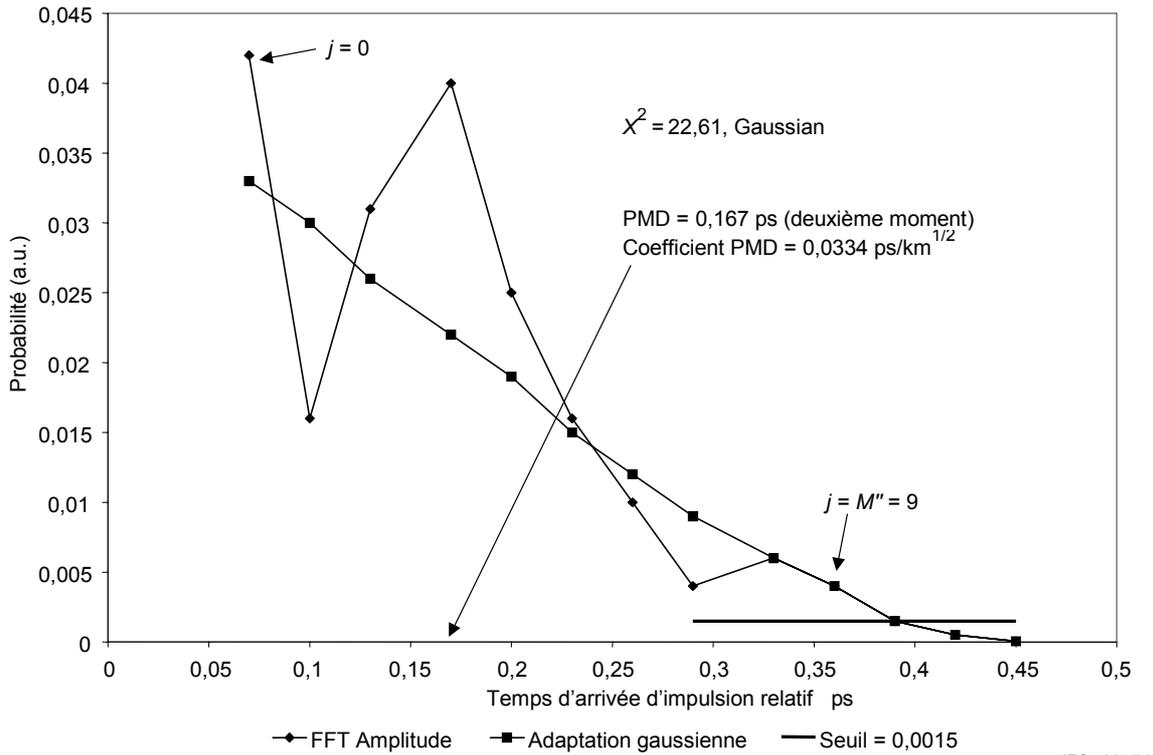


Figure A.3 – Dispersion de mode de polarisation (PMD) par l’analyse de Fourier

A.3.3 Plage spectrale

Pour les fibres à couplage aléatoire, il est nécessaire d’utiliser une plage spectrale suffisante pour former un ensemble spectral avec une précision suffisante. L’incertitude statistique peut être réduite en utilisant la plage spectrale la plus large possible (au moins 200 nm, par exemple). Il faut que la précision requise et donc la plage spectrale soient spécifiées avant la mesure.

En complément, de très faibles valeurs $\delta\tau$ donneront de très longues périodes en $R(\lambda)$, et il convient que la plage spectrale de λ_1 à λ_2 couvre au moins deux «cycles» complets, si possible. La plage spectrale couverte définit la valeur $\delta\tau$ la plus faible qui peut être résolue en $P(\delta\tau), \delta\tau_{min}$:

$$\delta\tau_{min} = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)c_0} \tag{A.8}$$

où le facteur 2 est introduit pour permettre que 2 points de données en P et adjacents à 0 soient généralement ignorés. Par exemple pour $\lambda_1 = 1\,270$ nm, $\lambda_2 = 1\,700$ nm, $\delta\tau_{min} = 0,033$ ps.

A.3.2.3 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 a link. In this case, both centroid determination (Equation (A.6)) and the second moment derivation (Equation (A.7)) may be required. Note that spikes in $P(\delta\tau)$ may only be determined beyond the $\delta\tau_{last}$ computed.

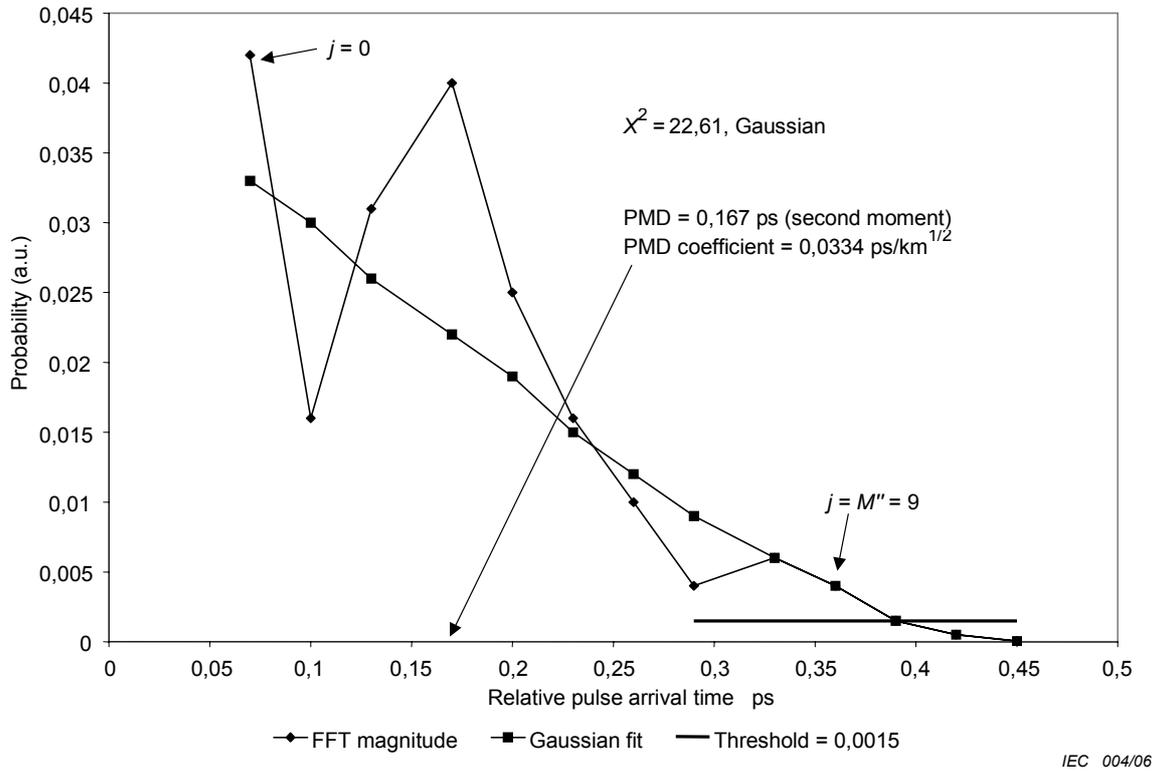


Figure A3 – PMD by Fourier analysis

A.3.3 Spectral range

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

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

$$\delta\tau_{min} = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)c_0} \tag{A.8}$$

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

Pour des fibres à PMD importante et à couplage négligeable, avec des données de rapport $R(\lambda)$ ressemblant à celles illustrées dans la Figure A.2, l'exigence relative au moyennage spectral décrit ci-dessus peut être assouplie et la plage spectrale peut être réduite (par exemple $(\lambda_2 - \lambda_1 \sim 30 \text{ nm})$) afin de permettre la variation de la PMD en fonction de la longueur d'onde à examiner.

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

Annexe B (normative)

Méthode dévaluation des paramètres de Stokes

Cette annexe contient les exigences spécifiques à la méthode B, Méthode d'évaluation des paramètres de Stokes.

B.1 Appareillage

La Figure B.1 illustre une représentation schématique possible pour la méthode B, généralement utilisée dans la méthode d'analyse des valeurs propres de la Matrice de Jones (JME)

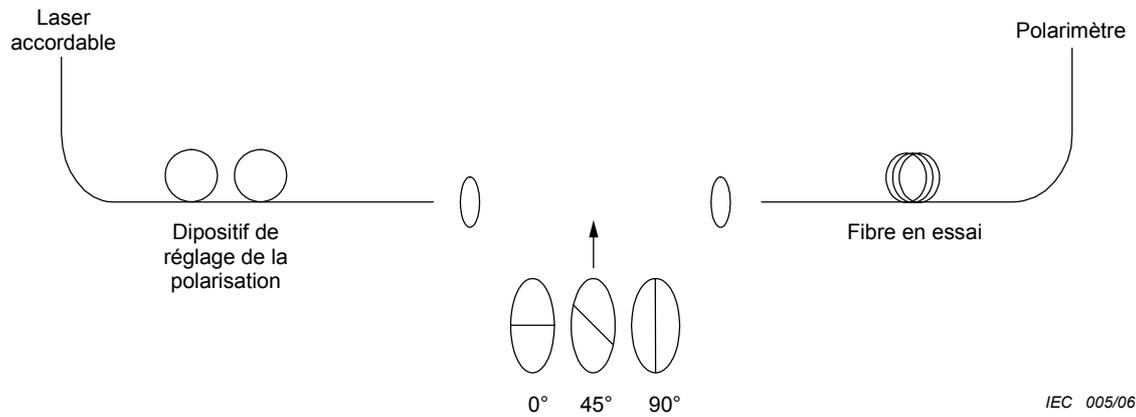
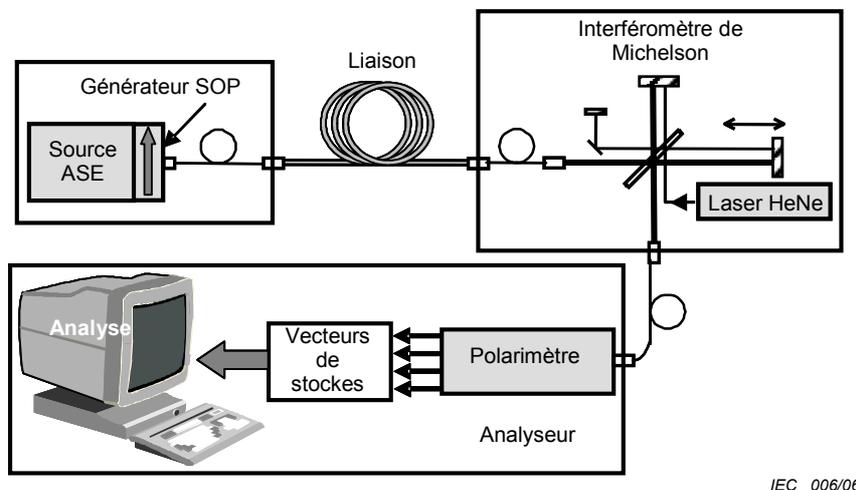


Figure B.1 – Représentation schématique pour la méthode B utilisant une source à bande étroite (laser accordable)

La Figure B.2 illustre une autre représentation schématique possible pour la méthode B, généralement utilisée dans la méthode d'analyse de la sphère de Poincaré (PSA).



IEC 006/06

Figure B.2 – Représentation schématique pour la méthode B utilisant une source à large bande (émission spontanée amplifiée (ASE))

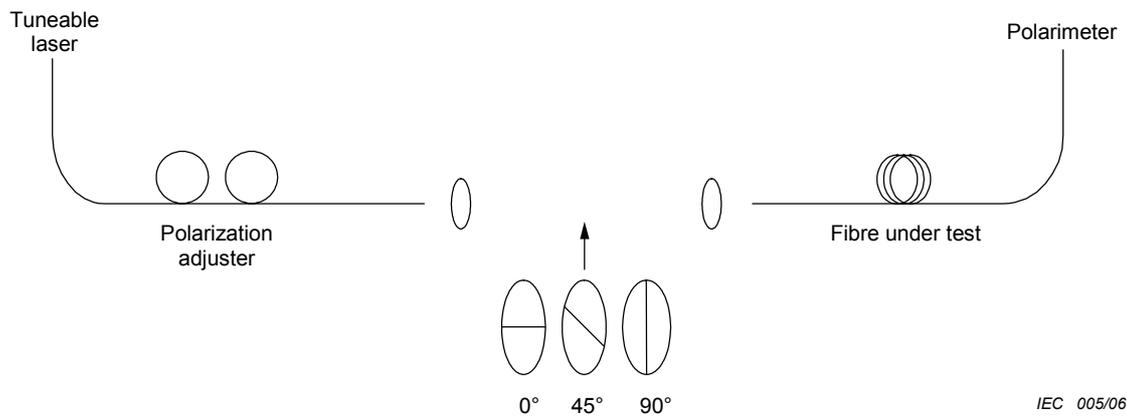
Annex B (normative)

Stokes parameter evaluation method

This annex contains requirements specific to Method B, Stokes parameter evaluation method.

B.1 Apparatus

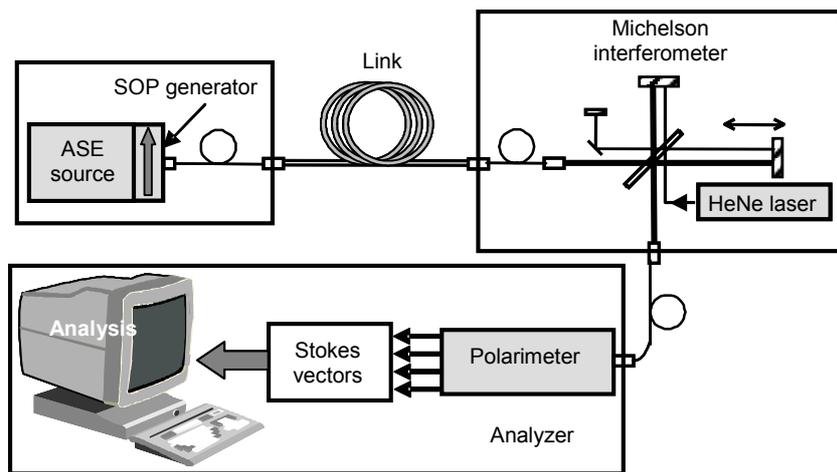
Figure B.1 shows a possible block diagram for Method B, typically used with JME.



IEC 005/06

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

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



IEC 006/06

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

B.1.1 Source lumineuse

Dans tous les cas, il est possible d'utiliser deux types de sources de lumière, selon le type de polarimètre utilisé. Une source à bande étroite, telle que le laser réglable indiqué sur la Figure B.1, peut être utilisée avec un analyseur de polarisation. Pour les liaisons amplifiées, le degré de polarisation (DOP) de la source à bande étroite doit être maintenu supérieur à une certaine limite sur toute la plage de longueurs d'onde pour éviter l'effet adverse de l'émission spontanée amplifiée (ASE) généré par les amplificateurs. En variante, on peut utiliser une source à large bande de puissance élevée avec un polarimètre à filtre passe-bande étroit tel qu'un analyseur de spectre optique ou un interféromètre utilisé comme un analyseur de spectre par transformée de Fourier placé avant le polarimètre, avant ou après la liaison en essai. Dans le cas d'une source à large bande, on prendra comme largeur spectrale la largeur du filtre, pour les besoins des calculs. Pour les liaisons amplifiées, la source à large bande présente toujours une quantité suffisante de longueurs d'onde disponibles pour éviter l'exigence sur le degré de polarisation (DOP) similaire à la source à bande étroite, sauf si l'émission spontanée amplifiée (ASE) de la liaison est élevée et présente un spectre plat sur toute la plage de longueurs d'onde en question.

Dans les deux cas, la largeur spectrale doit être suffisamment faible pour maintenir le degré de polarisation (DOP) prescrit (se reporter à 5.1), mais pas trop faible par rapport à la taille d'échelon sélectionnée pour éviter les phénomènes d'interférence cohérente inutiles et autres bruits parasites. Dans les deux cas, la plage de longueurs d'ondes doit être suffisamment étendue pour permettre de mesurer la PMD avec une précision suffisante (se reporter à B.3).

Le contrôleur de polarisation doit être capable de balayer au moins trois états de polarisation (SOP) connus et distincts (typiquement linéaires 0°, 45° et 90°) (se reporter à l'équation (E.4) pour chaque longueur d'onde de mesure).

B.1.2 Polarimètre

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

B.2 Procédure

La sortie de la liaison est couplée à l'analyseur qui comprend le polarimètre. Les longueurs d'onde sont balayées sur une plage appropriée pour la zone de la longueur d'onde et la précision prescrite (se reporter à 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 retard de groupe différentiel (DGD) maximale prévue $\Delta\tau_{\max}$, de la longueur d'onde centrale de la zone mesurée λ_0 et de la vitesse de la lumière dans le vide c (299792458 m/s) comme suit:

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

Par exemple, le produit du DGD maximal et de la taille du pas doit rester inférieur à 4 ps-nm pour une longueur d'onde de 1 550 nm et à 2,8 ps-nm pour une longueur d'onde de 1 300 nm. Cette exigence permet de s'assurer que, d'une longueur d'onde d'essai à la suivante, l'état de polarisation de sortie effectue une rotation de moins de 180° autour de l'axe des états principaux de la sphère de Poincaré. Si on ne peut pas effectuer un calcul approximatif de $\Delta\tau_{\max}$, on peut effectuer une série de mesures sur des échantillons sur toute la gamme des longueurs d'onde, en utilisant pour chaque mesure une paire de longueurs d'onde très voisines qui conviennent pour la largeur spectrale et le pas de réglage minimal de la source optique. On multiplie le retard de groupe différentiel (DGD) maximal ainsi mesuré par un coefficient de sécurité de 3, on remplace $\Delta\tau_{\max}$ par cette valeur dans l'expression ci-dessus et on calcule la valeur de $\delta\lambda$ à utiliser dans la mesure réelle. Si l'on craint que l'incrément de la

B.1.1 Light source

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

In both cases, the spectral width shall be sufficiently small to maintain the required DOP (see 5.1), but not too small compared to the selected step size to avoid unnecessary coherent interference effects and other spurious noises. In both cases, the wavelength range shall be sufficiently wide to provide a valid PMD measurement of sufficient precision (see B.3).

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

B.1.2 Polarimeter

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

B.2 Procedure

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

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

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

longueur d'onde utilisé pour une mesure soit trop grand, on peut répéter la mesure en utilisant un plus petit incrément de longueur d'onde. Si la forme de la courbe de variation du DGD en fonction de la longueur d'onde et le retard de groupe différentiel (DGD) moyen restent inchangés, cela signifie que l'incrément de longueur d'onde initial était satisfaisant.

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

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

Les données de mesure sont regroupées pour chaque longueur d'onde. Pour chaque longueur d'onde, les états de polarisation (SOP) passent par les états utilisés (se reporter à l'équation (E.4)) et les vecteur de Stokes en sortie correspondants, \hat{H} , \hat{V} et \hat{Q} , sont enregistrés. Les vecteurs de Stokes en sortie sont normalisés à une longueur unitaire. Pour calculer les valeurs propres de la matrice de Jones (JME), B.3.1, les vecteur de Stokes normalisés doivent être convertis en vecteurs de Jones normalisés en utilisant l'équation (E.4) (en supposant $0 < \theta < \pi$) avant de procéder au calcul. Pour la méthode d'analyse de la sphère de Poincaré (PSA), B.3.2, les vecteurs de Stokes en sortie normalisés sont utilisés sans conversion.

B.3 Calculs

Les méthodes de calcul nécessitent l'évaluation des différences entre les vecteurs à une fréquence optique angulaire ω et la suivante à $\omega + \Delta\omega$. (La fréquence optique angulaire est donnée par $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$.) Les deux méthodes de calcul aboutissent toutes à une série de valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) en fonction de la longueur d'onde. La Figure E.4 fournit un exemple d'une telle fonction. En variante, les valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) peuvent être affichées sous la forme d'un histogramme tel que celui illustré à la Figure E.5.

La moyenne de ces valeurs de retard de groupe différentiel (DGD) est la valeur de la PMD.

NOTE Les calculs d'analyses des valeurs propres de la matrice de Jones et de la sphère de Poincaré (JME et psA) sont mathématiquement équivalents pour des hypothèses de PMD du premier ordre et lorsque la perte dépendant de la polarisation (PDL) est négligeable.

B.3.1 Analyse des valeurs propres de la matrice de Jones (JME)

En ce qui concerne l'analyse des valeurs propres de la Matrice de Jones (JME), la matrice de Jones de réponse est calculée pour chaque longueur d'onde à partir des paramètres de Stokes. Pour chaque incrément de longueur d'onde, on calcule le produit de la matrice de Jones $T(\omega + \Delta\omega)$ à la fréquence optique supérieure et de l'inverse de la matrice de Jones $T^{-1}(\omega)$ à la fréquence optique inférieure. Le retard de groupe différentiel (DGD) $\Delta\tau$ pour l'incrément de longueur d'onde particulier est déterminé à partir de l'expression suivante:

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

increment used for a measurement was too large, the measurement may be repeated with smaller wavelength increment. If the shape of the curve of DGD versus wavelength and the mean DGD are essentially unchanged, the original wavelength increment was satisfactory.

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

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

The measurement data are gathered for each wavelength. For each wavelength, the input SOPs are cycled through the states used (see Equation (E.4)), and the correspondent output Stokes vectors, \hat{H} , \hat{V} and \hat{Q} , are recorded. The output Stokes vectors are normalized to unit length. For the JME calculation, B.3.1, the normalized Stokes vectors shall be converted to normalized Jones vectors using Equation (E.4) (assuming $0 < \theta < \pi$) before the calculation is completed. For the PSA method, B.3.2, the normalized output Stokes vectors are used without conversion.

B.3 Calculations

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

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

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

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

B.3.1 Jones matrix eigenanalysis (JME)

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

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

où

ρ_1 et ρ_1^* sont les valeurs propres complexes de $T(\omega+\Delta\omega)T^{-1}(\omega)$

Arg est la fonction argument, c'est-à-dire $\text{Arg}(\eta e^{i\theta}) = \theta$

η est l'amplitude (réelle) du nombre complexe.

$T(\omega+\Delta\omega)$ et $T(\omega)$ sont obtenus à partir des mesures et des calculs de B.3.1.1.

Pour les besoins de l'analyse des données, chaque valeur du retard de groupe différentiel (DGD) est le retard de groupe différentiel (DGD) pour la longueur d'onde inférieure. La série de valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) obtenues à partir d'une série d'incrément de longueurs d'onde sur une gamme de longueurs d'ondes comprend une mesure unique de la PMD de la liaison.

B.3.1.1 Analyse des valeurs propres de la matrice de Jones (JME) Calcul du retard de groupe différentiel (DGD)

R.C. Jones a donné un algorithme explicite pour déterminer de manière expérimentale la matrice de Jones de transmission directe T d'une liaison optique inconnue, linéaire, ne variant pas dans le temps [2]. La restriction de linéarité exclut les liaisons optiques qui génèrent de nouvelles fréquences optiques. La restriction d'invariance dans le temps s'applique uniquement à la transformation de polarisation causée par la liaison et n'inclut pas le retard de phase optique absolu. C'est la raison pour laquelle la présente technique peut être utilisée pour caractériser les réseaux de fibres, même si le retard de phase à travers la fibre dérive pendant la mesure, à condition que l'appareillage de mesure du retard de groupe différentiel (DGD) ne soit pas affecté par les variations de retard de phase.

La mesure de la matrice de Jones nécessite l'application de trois états de polarisation (SOP) connus et distincts tels qu'une lumière polarisée linéairement à la liaison. Dans le processus décrit ci-dessous, les états de polarisation (SOP) orientés à 0° , 45° et 90° sont utilisés, comme cela est décrit par Jones et illustré sur la Figure E.3. Les calculs peuvent être généralisés pour s'adapter à d'autres états de polarisation (SOP) en entrée.

Tout vecteur de Jones V peut être complètement spécifié par une magnitude, une phase absolue et un vecteur unitaire \hat{V} qui localise l'état de polarisation sur la sphère de Poincaré. Pour mesurer la matrice de Jones d'une liaison, un stimulus de champ optique d'état de polarisation (SOP) linéaire parallèle à l'axe des x (0°) est d'abord généré et le vecteur unitaire de Jones de réponse \hat{H} qui en résulte est mesuré/calculé à la sortie de la liaison. Similairement, les champs de stimulus de polarisation linéaire parallèle à l'axe y (90°), et parallèle à la bissectrice de l'angle entre les axes positifs x et y (45°) aboutissent à des vecteurs de Jones unitaires de réponse \hat{V} et \hat{Q} , respectivement.

Trois rapports complexes indépendants des intensités des trois stimuli de champs peuvent maintenant être formés à partir des composantes en x et y de \hat{H} , \hat{V} et \hat{Q} :

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

Un quatrième rapport $k_4 = (k_3 - k_2) / (k_1 - k_3)$ est ensuite trouvé. Jusqu'à une constante complexe β , la matrice de transmission de Jones T est donnée par

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

where

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

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

η is the magnitude (real) of the complex number.

$T(\omega+\Delta\omega)$ and $T(\omega)$ are obtained from measurements and calculations of B.3.1.1.

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

B.3.1.1 Jones matrix eigenanalysis (JME) DGD calculation

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

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

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

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

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

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

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

B.3.1.2 Détermination du retard de groupe différentiel (DGD)

Par définition des états principaux de polarisation (PSP), une liaison générale est associée à une paire d'état de polarisation (SOP) principaux d'entrée $\hat{x}(\omega)$ qui, étant donné que l'état de polarisation en entrée est maintenu constant alors que la fréquence optique en radians ω est légèrement modifiée, donne une paire d'états de polarisation (SOP) principaux de sortie dont les vecteurs unités sont invariants au premier ordre en ω . Pour une matrice de transmission générale de Jones $T(\omega)$, on peut exprimer les états principaux de polarisation (PSP) de sortie comme une magnitude $\sigma(\omega)$ et une phase absolue $\phi(\omega)$ fois un vecteur unité $\hat{y}(\omega)$ qui spécifie l'état de polarisation des états principaux de polarisation (PSP) de sortie.

$$y(\omega) = T(\omega)\hat{x}(\omega) = \sigma(\omega)e^{i\phi(\omega)}\hat{y}(\omega) \quad (B.6)$$

$\sigma(\omega)$ et $\phi(\omega)$ peuvent varier avec ω , mais $\hat{y}(\omega)$ est invariant en fréquence au premier ordre par définition des états principaux de polarisation (PSP) de sortie. En utilisant des primes pour indiquer la dérivée par rapport à ω , la dérivée de (B.6) donne

$$y' = T' \hat{x} = [\sigma' / \sigma + i\phi'] y + \sigma e^{i\phi} \hat{y}' \quad (B.7)$$

La première dérivée de la phase absolue ϕ' est le retard de groupe τ_g à travers le réseau. Si le réseau n'est pas parfaitement polarisant, sa matrice de transmission T est non singulière et l'entrée peut être exprimée en fonction de la sortie comme $\hat{x} = T^{-1} y$. En réglant explicitement \hat{y}' à 0, on obtient la relation de valeur propre

$$\sigma e^{i\phi} \hat{y}' = T' T^{-1} - [(\sigma' / \sigma + i\tau_g) I] y = 0 \quad (B.8)$$

où I est la matrice identité, une matrice carré avec des 1 sur la diagonale et des 0 ailleurs.

Les parties imaginaires des valeurs propres du produit de matrice sont des retards de groupe associés aux états principaux de polarisation (PSP), et le retard de groupe différentiel (DGD) $\Delta\tau$ qui conduit à la PMD est donné par la différence des parties imaginaires de deux valeurs propres. Les états principaux de polarisation (PSP) de sortie eux-mêmes sont les vecteurs propres de $T' T^{-1}$, qui peuvent être non unitaires pour des réseaux avec perte dépendant de la polarisation (PDL), auquel cas les états principaux de polarisation (PSP) de sortie ne sont pas nécessairement orthogonaux.

La mesure de T' et T , y compris la mesure de la phase absolue, devrait permettre le calcul direct des deux retards de groupe et de $\Delta\tau$ mais, dans la pratique, deux restrictions sont imposées par la technique de mesure d'analyse des valeurs propres de la matrice de Jones précédemment décrite. Au lieu de mesurer directement T' , il faut faire une approximation avec $T' \sim [T(\omega + \Delta\omega) - T(\omega)] / \Delta\omega$ pour un $\Delta\omega$ fini. Si l'intervalle de fréquence $\Delta\omega$ est assez faible pour que chaque état principal de polarisation (PSP) de sortie subisse à peu près la même perte à ω et $\omega + \Delta\omega$, alors $\sigma' \Delta\omega / \sigma \sim 0$ et (B.8) peut être réécrite comme suit:

$$[T(\omega + \Delta\omega)T^{-1}(\omega) - (1 + i\tau_g \Delta\omega) I] y = 0 \quad (B.9)$$

B.3.1.2 Differential group delay (DGD) determination

By definition of the PSP, a general link has associated with it a pair of input principal SOPs $\hat{x}(\omega)$ which, as the input SOP is held constant and while the radian optical frequency ω is changed a small amount, results in a pair of output principal SOPs whose unit vectors are invariant to first order over ω . For a general transmission Jones matrix, $T(\omega)$, we can express an output PSP as a magnitude $\sigma(\omega)$ and absolute phase $\phi(\omega)$ times a unit vector, $\hat{y}(\omega)$, which specifies the SOP of the output PSP:

$$y(\omega) = T(\omega)\hat{x}(\omega) = \sigma(\omega)e^{i\phi(\omega)}\hat{y}(\omega) \quad (\text{B.6})$$

$\sigma(\omega)$ and $\phi(\omega)$ may vary with ω , but $\hat{y}(\omega)$ is frequency-invariant to first order by definition of the output PSP. Using primes to denote differentiation with respect to ω , differentiation of (B.6) results in

$$y' = T' \hat{x} = [\sigma' / \sigma + i\phi']y + \sigma e^{i\phi} \hat{y}' \quad (\text{B.7})$$

The first derivative of the absolute phase ϕ' is the group delay τ_g through the network. If the network is not perfectly polarizing, its transmission matrix T is non-singular and the input can be expressed in terms of the output as $\hat{x} = T^{-1}y$. Explicitly setting \hat{y}' to zero, we obtain the eigenvalue relation

$$\sigma e^{i\phi} \hat{y}' = T' T^{-1} - [(\sigma' / \sigma + i\tau_g)I]y = 0 \quad (\text{B.8})$$

where I is the identity matrix, a square matrix with values of 1 on the diagonal and 0 elsewhere.

The imaginary parts of the eigenvalues of the matrix product are the group delays associated with the PSPs, and the DGD, $\Delta\tau$, which leads to PMD, is given by the difference of the imaginary parts of the two eigenvalues. The output PSP themselves are the eigenvectors of $T' T^{-1}$, which may be non-unitary for networks with PDL, in which case the output PSPs are not necessarily orthogonal.

Measurement of T' and T , including measurement of the absolute phase, would allow direct calculation of the two group delays and $\Delta\tau$, but in practice two restrictions are imposed by the Jones matrix measurement technique previously described. Instead of measuring T' directly, we must approximate it as $T' \sim [T(\omega + \Delta\omega) - T(\omega)] / \Delta\omega$ for a finite $\Delta\omega$. If the frequency interval $\Delta\omega$ is small enough so that each output PSP suffers nearly the same loss at ω and $\omega + \Delta\omega$, then $\sigma' \Delta\omega / \sigma \sim 0$ and Equation (B.8) can be rewritten as

$$[T(\omega + \Delta\omega)T^{-1}(\omega) - (1 + i\tau_g \Delta\omega)I]y = 0 \quad (\text{B.9})$$

La seconde restriction provient du fait que $T(\omega + \Delta\omega) T^{-1}(\omega)$, et donc ses valeurs propres associées ρ_1 et ρ_2 , ne peuvent être déterminées que dans le cadre d'une constante complexe, ce qui empêche de déterminer individuellement les deux retards de groupe. Lorsque la perte à travers la liaison en essai est indépendante de la polarisation, les valeurs propres de $T(\omega + \Delta\omega) T^{-1}(\omega)$ sont déterminées comme $\beta\rho_1$ et $\beta\rho_2$, où β , est une constante complexe et $\rho_k = \exp(i\tau_{g,k}\Delta\omega)$. Le retard de groupe différentiel (DGD) $\Delta\tau$ peut donc être exprimé comme

$$\Delta\tau = |\tau_{g,1} - \tau_{g,2}| = |\text{Arg}(\rho_1 / \rho_2) / \Delta\omega| \quad (\text{B.10})$$

où

ρ_1 et ρ_2 sont les valeurs propres de $T(\omega + \Delta\omega) T^{-1}(\omega)$

Arg est la fonction argument, c'est-à-dire $\text{Arg}(ae^{i\theta}) = \theta$.

En présence de perte dépendante de la polarisation (PDL), les valeurs propres peuvent encore être approximées comme

$$\rho_k = 1 + i\tau_{g,k}\Delta\omega \equiv \exp(i\tau_{g,k}\Delta\omega) \quad (\text{B.11})$$

Dans la pratique, on peut réduire l'impact de la perte dépendante de la polarisation (PDL) sur la mesure de $\Delta\tau$ en utilisant des intervalles plus faibles de fréquence optique en radians $\Delta\omega$. Dans tous les cas, la condition $\Delta\tau\Delta\omega < \pi$ doit être satisfaite pour éviter les ambiguïtés de la fonction argument à valeurs multiples.

B.3.2 Analyse de la sphère de Poincaré (PSA) Calcul du retard de groupe différentiel (DGD)

L'analyse présentée en [4] est une variante à la fonction argument des valeurs propres de la matrice de Jones (JME). Elle est basée sur une fonction en Arc sinus.

À partir des vecteurs de Stokes normalisés mesurés \hat{H} , \hat{V} , \hat{Q} , calculer

$$\hat{h} = \hat{H}, \quad \hat{q} = \frac{\hat{H} \times \hat{Q}}{|\hat{H} \times \hat{Q}|} \times \hat{H}, \quad \hat{v} = \frac{\hat{q} \times \hat{V}}{|\hat{q} \times \hat{V}|} \times \hat{q} \quad (\text{B.12})$$

L'analyse est ainsi indépendante des états de polarisation d'entrée et donc il n'est pas nécessaire de les connaître.

À partir des vecteurs de Stokes \hat{h} , \hat{v} et \hat{q} , former les produits vectoriels $\hat{c} = \hat{h} \times \hat{q}$ et $\hat{c}' = \hat{q} \times \hat{v}$ à chaque longueur d'onde. Pour chaque incrément de longueur d'onde, calculer les différences finies

$$\begin{aligned} \Delta\hat{h} &= \hat{h}(\omega + \Delta\omega) - \hat{h}(\omega) & \Delta\hat{q} &= \hat{q}(\omega + \Delta\omega) - \hat{q}(\omega) & \Delta\hat{v} &= \hat{v}(\omega + \Delta\omega) - \hat{v}(\omega) \\ \Delta\hat{c} &= \hat{c}(\omega + \Delta\omega) - \hat{c}(\omega) & \Delta\hat{c}' &= \hat{c}'(\omega + \Delta\omega) - \hat{c}'(\omega) \end{aligned} \quad (\text{B.13})$$

The second restriction arises from the fact that $T(\omega+\Delta\omega)T^{-1}(\omega)$, and therefore its associated eigenvalues ρ_1 and ρ_2 , can be determined only to within a complex constant, preventing determination of the two group delays individually. When the loss through the link under test is independent of polarization, the eigenvalues of $T(\omega+\Delta\omega)T^{-1}(\omega)$ are determined to be $\beta\rho_1$ and $\beta\rho_2$, where β is a complex constant and $\rho_k = \exp(i\tau_{g,k}\Delta\omega)$. The DGD $\Delta\tau$ can therefore be expressed as

$$\Delta\tau = |\tau_{g,1} - \tau_{g,2}| = |\text{Arg}(\rho_1 / \rho_2) / \Delta\omega| \quad (\text{B.10})$$

where

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

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

In the presence of PDL, the eigenvalues can still be approximated as

$$\rho_k = 1 + i\tau_{g,k}\Delta\omega \equiv \exp(i\tau_{g,k}\Delta\omega) \quad (\text{B.11})$$

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

B.3.2 Poincaré sphere analysis (PSA) DGD calculation

The analysis presented in [4] is an alternative to the argument function of JME. Instead it is based on an arcsine function.

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

$$\hat{h} = \hat{H}, \quad \hat{q} = \frac{\hat{H} \times \hat{Q}}{|\hat{H} \times \hat{Q}|} \times \hat{H}, \quad \hat{v} = \frac{\hat{q} \times \hat{V}}{|\hat{q} \times \hat{V}|} \times \hat{q} \quad (\text{B.12})$$

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

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 wavelength. For each wavelength increment, compute the finite differences,

$$\begin{aligned} \Delta\hat{h} &= \hat{h}(\omega + \Delta\omega) - \hat{h}(\omega) & \Delta\hat{q} &= \hat{q}(\omega + \Delta\omega) - \hat{q}(\omega) & \Delta\hat{v} &= \hat{v}(\omega + \Delta\omega) - \hat{v}(\omega) \\ \Delta\hat{c} &= \hat{c}(\omega + \Delta\omega) - \hat{c}(\omega) & \Delta\hat{c}' &= \hat{c}'(\omega + \Delta\omega) - \hat{c}'(\omega) \end{aligned} \quad (\text{B.13})$$

Trouver le DGD, $\Delta\tau$, pour un incrément de longueur d'onde particulier, à partir de l'expression suivante:

$$\Delta\tau = \frac{1}{\Delta\omega} \cdot \left[\arcsin\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2} (\Delta\hat{h}^2 + \Delta\hat{q}^2 + \Delta\hat{c}^2)}\right) + \arcsin\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2} (\Delta\hat{q}^2 + \Delta\hat{v}^2 + \Delta\hat{c}^2)}\right) \right] \quad (\text{B.14})$$

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

Chaque valeur du retard de groupe différentiel (DGD) est prise pour représenter le retard de groupe différentiel au milieu de l'incrément de longueur d'onde correspondant.

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

$$\Delta\tau = \frac{1}{\Delta\omega} \cdot \left[\arcsin\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2}(\Delta\hat{h}^2 + \Delta\hat{q}^2 + \Delta\hat{c}^2)}\right) + \arcsin\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2}(\Delta\hat{q}^2 + \Delta\hat{v}^2 + \Delta\hat{c}^2)}\right) \right] \quad (\text{B.14})$$

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

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

Annexe C (normative)

Méthode interférométrique

La présente annexe contient des exigences détaillées pour effectuer des mesures de PMD par la Méthode interférométrique (INTY) – Méthode C. Cette méthode donne normalement la valeur PMD_{RMS} (valeur moyenne quadratique du retard de groupe différentiel) (se reporter à l'équation (1b)), qui peut être convertie en la valeur $PMD_{average}$ (moyenne linéaire du retard de groupe différentiel) en utilisant l'équation (1c) et en supposant que les valeurs correspondent exactement à la distribution de Maxwell.

La méthode C repose sur deux analyses:

- L'analyse traditionnelle (TINTY) utilisant un ensemble de conditions de fonctionnement spécifiques et un montage élémentaire [9-11];
- Une analyse générale (GINTY) n'utilisant pas de conditions de fonctionnement restrictives, mais dont le montage est modifié par rapport au TINTY [12].

Un montage générique est illustré sur la Figure C.1 qui constitue la base de la mise en œuvre expérimentale de la méthode C (INTY). Ce montage peut présenter une variance qui peut être utilisée. Elle est représentée ci-dessous.

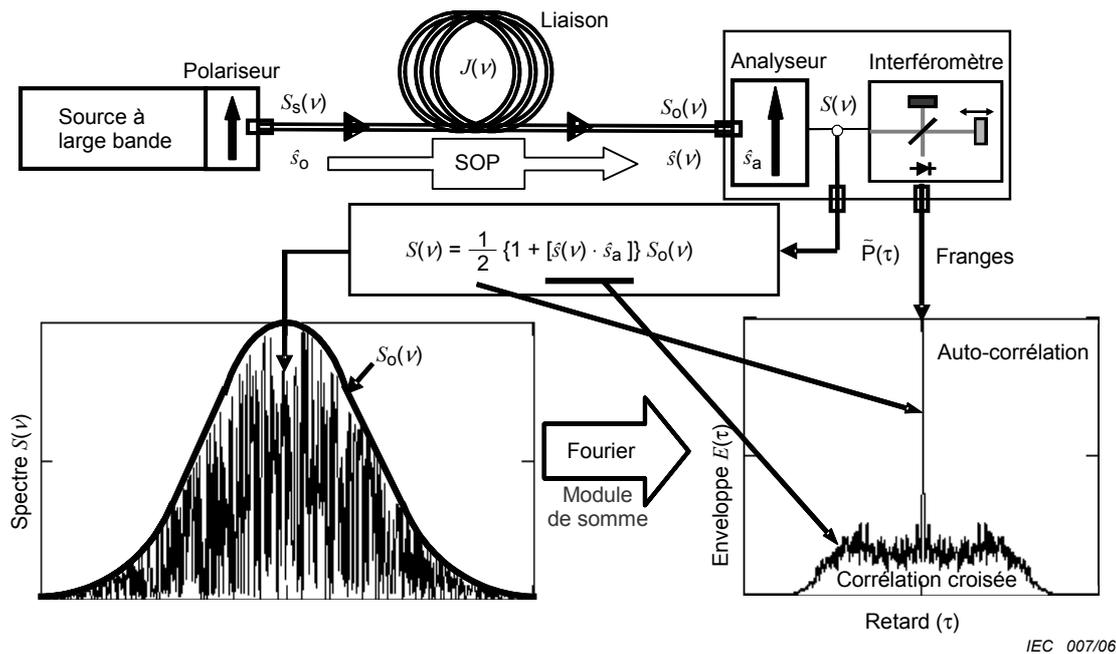


Figure C.1 – Montage générique pour la méthode C (INTY)

Les paramètres utilisés sur la Figure C.1 et dans cette annexe sont:

- ν fréquence optique ($\lambda\nu = c$);
- τ différence de temps de transmission aller et retour entre les deux bras de l'interféromètre;
- $S_s(\nu)$ spectre optique, au niveau de l'entrée du dispositif en essai \equiv densité spectrale de $\bar{E}_s(\nu)$, le spectre de la source;

Annex C (normative)

Interferometric method

This annex contains detailed requirements for completing PMD measurements using the interferometric method (INTY) – Method C. This method normally reports the PMD_{RMS} (RMS DGD) metric (see Equation (1b)), which can be converted to the $PMD_{average}$ (linear average DGD) metric using Equation (1c) under the assumption of a perfect fit with a Maxwell distribution.

Method C is based on two analyzes:

- The traditional analysis (TINTY) using a set of specific operating conditions for its successful applications and a basic set-up [9-11];
- A general analysis (GINTY) using no limiting operating conditions but using a modified set-up compared to TINTY [12].

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

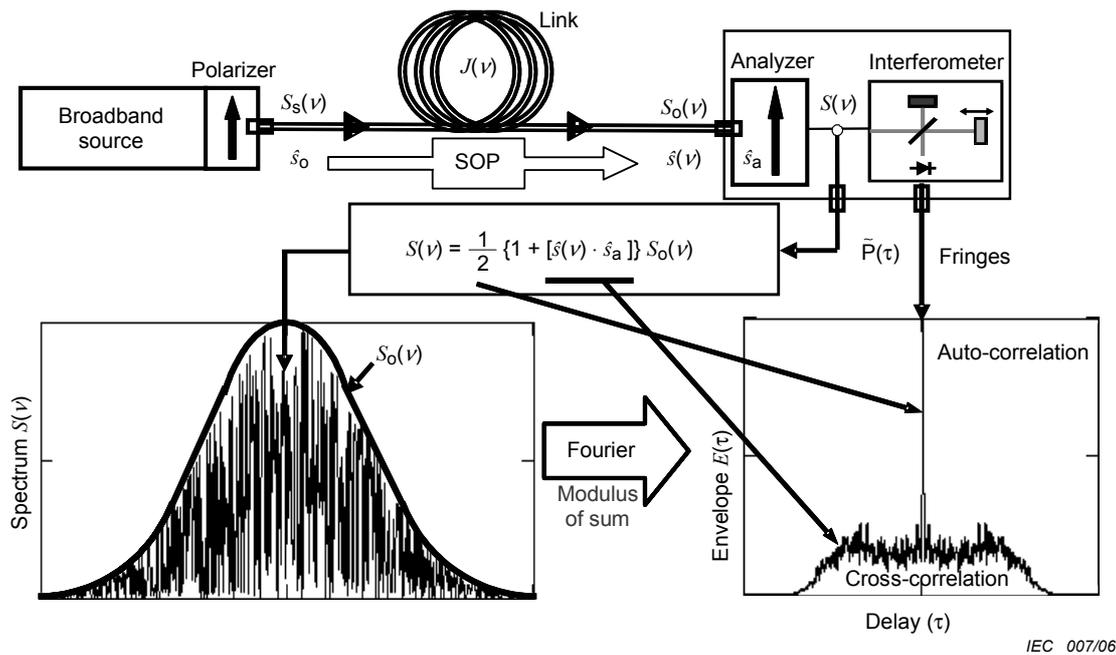


Figure C.1 – Generic set-up for Method C (INTY)

Parameters used in Figure C.1 and throughout this annex are:

- 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 DUT input \equiv spectral density of $\bar{E}_s(\nu)$, the source spectrum;

- $S_o(\nu)$ spectre optique, au niveau de la sortie du dispositif en essai (entrée de l'analyseur);
- $S(\nu)$ spectre optique, au niveau de la sortie de l'analyseur (entrée de l'interféromètre);
- \hat{s}_0 état de polarisation (SOP) en entrée (au niveau de l'entrée du dispositif en essai; un vecteur unitaire de Stokes);
- $\hat{s}(\nu)$ état de polarisation (SOP) en sortie (au niveau de la sortie du dispositif en essai);
- $\hat{s}_a(\nu)$ axe de transmission de l'analyseur;
- $x(\nu) \equiv \hat{s}_A \times \hat{s}(\nu)$: paramètres des Stokes donnant la projection de $\hat{s}(\nu)$ sur l'axe de transmission de l'analyseur. C'est le paramètre $x(\nu)$, qui contient les informations sur la PMD;
- $P(\tau)$ puissance optique au niveau de la sortie de l'interféromètre, en fonction du retard τ ,
- $\tilde{P}(\tau)$ partie de $P(\tau)$ fonction de τ (partie «courant alternatif»)
- P_0 partie constante de $P(\tau)$ (partie «courant continu»)
- $E(\tau)$ enveloppe des franges
- $E_x(\tau)$ enveloppe de la corrélation croisée
- $E_0(\tau)$ enveloppe de l'autocorrélation

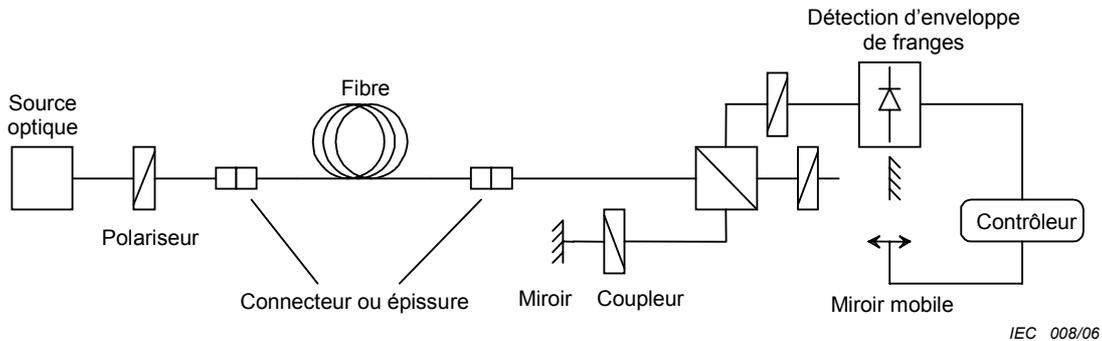
La puissance optique au niveau de la sortie de l'interféromètre, $P(\tau)$ est égale à la somme des parties «courant alternatif» et «courant continu». Les deux parties sont égales pour $\tau = 0$ et donc la partie «courant alternatif» peut être calculée. Dans le cas d'un interféromètre idéal, la partie «courant alternatif» est une fonction paire dont la moitié droite est égale à la transformée Fourier cosinusoidale du spectre optique $S(\nu)$ émise par l'analyseur. Dans le cas d'un interféromètre non idéal, il convient d'apporter certaines corrections en fonction de l'installation.

Pour la méthode TINTY, l'enveloppe de l'interférogramme $E(\tau)$ est la valeur absolue de la partie «courant alternatif». Pour la méthode GINTY, les calculs nécessaires à l'obtention de la corrélation croisée et de l'autocorrélation sont décrits en C.2.1.3. Ces calculs nécessitent deux interférogrammes mesurés qui proviennent de l'analyseur réglé sur deux états de polarisation (SOP) orthogonaux.

C.1 Analyse traditionnelle (TINTY)

C.1.1 Appareillage

La Figure C.2 illustre une représentation schématique pour les mesures de liaisons par la méthode C (TINTY).



IEC 008/06

Figure C.2 – Représentation schématique pour la Méthode C (TINTY)

- $S_0(\nu)$ optical spectrum, at DUT output (analyzer input);
 $S(\nu)$ optical spectrum, at analyzer output (interferometer input);
 \hat{s}_0 input SOP (at DUT input; a unit Stokes vector);
 $\hat{s}(\nu)$ output SOP (at DUT output);
 $\hat{s}_a(\nu)$ analyzer transmission axis;
 $x(\nu) \equiv \hat{s}_A \times \hat{s}(\nu)$: Stokes parameter giving the projection of $\hat{s}(\nu)$ on the analyzer transmission axis. It is this parameter, $x(\nu)$, that contains the PMD information;
 $P(\tau)$ optical power at the interferometer output, as a function of delay τ ;
 $\tilde{P}(\tau)$ τ -dependent part of $P(\tau)$ ("a.c." part)
 P_0 constant part of $P(\tau)$ ("d.c." part)
 $E(\tau)$ fringe envelope
 $E_x(\tau)$ cross-correlation envelope
 $E_0(\tau)$ auto-correlation envelope

The optical power at the interferometer output, $P(\tau)$ is equal to the sum of "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 analyzer. 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 auto-correlation envelopes are described in C.2.1.3. These calculations involve two measured interferograms resulting from the analyzer being set at two orthogonal SOPs.

C.1 Traditional analysis (TINTY)

C.1.1 Apparatus

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

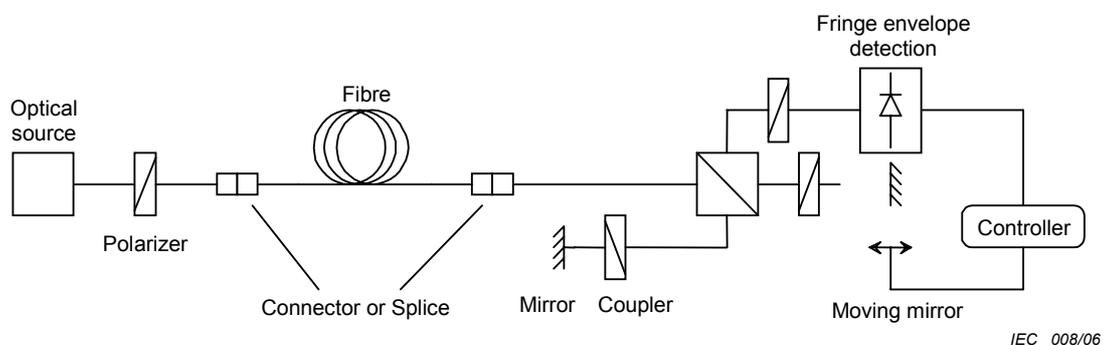


Figure C.2 – Schematic diagram for Method C (TINTY)

C.1.1.1 Source lumineuse

On utilise une source de lumière polarisée à large bande qui émet un rayonnement aux longueurs d'onde de mesure prévues, telle qu'une diode électroluminescente (DEL) ou une source superfluorescente. La longueur d'onde centrale λ_0 doit se situer dans la fenêtre 1 310 nm ou 1 550 nm ou toute autre fenêtre concernée. La forme spectrale doit être approximativement gaussienne, sans ondulations susceptibles d'influencer la fonction d'autocorrélation de la lumière émergente. Il est nécessaire que la largeur de raie de la source (que l'on appelle également largeur spectrale dans le champ de la DEL) $\Delta\lambda$ soit connue pour calculer le temps de cohérence, t_c , qui est déterminé à partir de l'équation suivante:

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

où

λ_0 est la longueur d'onde centrale de la source;

$\Delta\lambda$ est la largeur de raie de la source;

c est la vitesse de la lumière dans le vide.

C.1.1.2 Séparateur de faisceau

Le séparateur de faisceau est utilisé pour séparer la lumière polarisée incidente en deux composantes qui se propagent dans les bras de l'interféromètre. Le séparateur peut être un coupleur à fibres optiques ou un séparateur de faisceau à coin cubique.

C.1.1.3 Interféromètre

L'interféromètre doit être soit en espace libre, soit fibré. Utiliser un type Michelson, situé au niveau de l'extrémité du détecteur d'une liaison en essai. Une lame quart d'onde, par exemple, peut être utilisée pour éliminer la réponse de pic d'autocorrélation de l'interféromètre. Toutefois, il sera extrêmement difficile de trouver une lame quart d'onde qui offre un quart d'onde égal pour toutes les longueurs d'onde de la plage spectrale d'une DEL pour supprimer de manière efficace et complète le pic d'autocorrélation.

C.1.2 Procédure

C.1.2.1 Étalonnage

L'équipement est étalonné en mesurant une fibre hautement biréfringente de PMD connue. En variante, un ensemble de fibres hautement biréfringentes de PMD connue peut également être mesuré.

C.1.2.2 Procédure d'essai

Une extrémité de la liaison est couplée à la sortie polarisée de la source de lumière. L'autre extrémité est couplée à l'entrée de l'interféromètre. Ceci peut être réalisé au moyen de connecteurs à fibres normaux, d'épissures ou par un système d'alignement de fibre. Si ce dernier est utilisé, il convient d'appliquer une petite quantité d'huile adaptatrice d'indice au niveau des raccords pour éviter les problèmes de réflexion.

La puissance de sortie optique de la source de lumière est réglée à une valeur de référence caractéristique pour le système de détection utilisé. Pour obtenir un contraste de frange suffisant, la puissance optique doit être pratiquement la même dans les deux bras de l'interféromètre.

C.1.1.1 Light source

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

$$t_c = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda c} \quad (C1)$$

where

λ_0 is the source centre wavelength;

$\Delta\lambda$ is the source linewidth;

c is the speed of light in vacuum.

C.1.1.2 Beam splitter

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

C.1.1.3 Interferometer

The interferometer shall be an air type or a fibre type. Use a Michelson type, located at the detector end of the link under test. A quarter waveplate, for example, can be used to remove the autocorrelation peak response of the interferometer. However it will be extremely difficult to find a quarter waveplate that provides an equal quarter wave at every wavelength over the spectral range of a LED for an efficient and complete removal of the autocorrelation peak.

C.1.2 Procedure

C.1.2.1 Calibration

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

C.1.2.2 Routine operation

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

Une première acquisition est réalisée en déplaçant le miroir du bras de l'interféromètre et en enregistrant l'intensité de la lumière. À partir du motif de franges obtenu pour un état de polarisation choisi, le retard de PMD peut être calculé comme décrit en C.1.3. Un exemple typique de motif de franges pour un couplage de mode de polarisation aléatoire est représenté à la Figure C.3. Le motif de franges doit être un spectre gaussien lisse représentant un couplage de mode aléatoire idéal.

En cas de couplage de mode insuffisant ou en cas de PMD faible, il est recommandé de répéter la mesure pour différents SOP ou pour moduler l'état de polarisation au cours de la mesure afin d'obtenir un résultat qui constitue une moyenne sur tous les SOP.

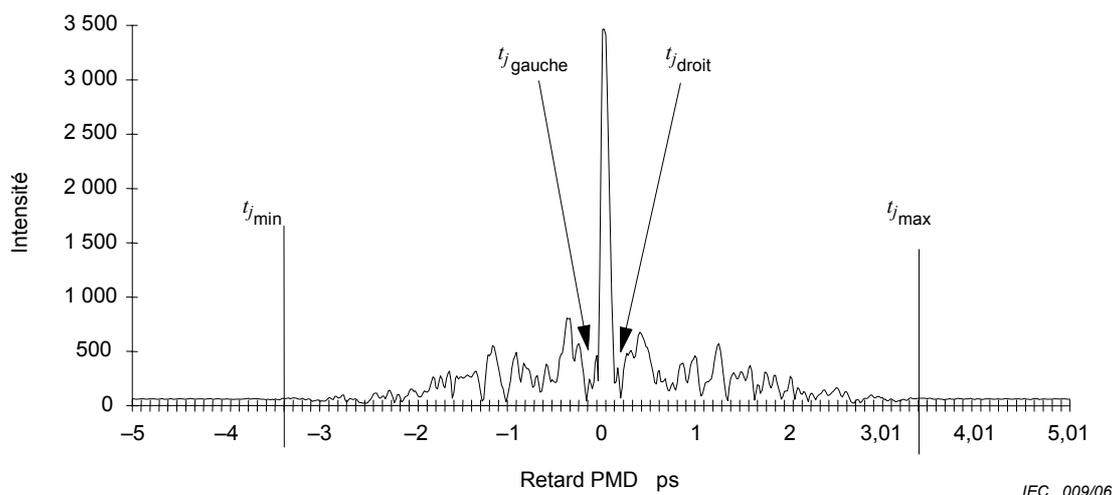


Figure C.3 – Données typiques obtenues par la Méthode C (TINTY)

C.1.3 Calculs

Les calculs suivants conviennent au régime de couplage de mode aléatoire/fort associé aux liaisons. La forme de l'interférogramme (en ne tenant pas compte du pic central) est caractérisée.

La valeur PMD_{RMS} est déterminée à partir du moment d'ordre 2 (largeur de la moyenne quadratique) de la fonction de corrélation croisée du signal détecté (interférogramme).

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

où

σ_{ε} est la largeur de la moyenne quadratique de l'enveloppe de corrélation croisée. Un algorithme détaillé du calcul provenant de l'enveloppe des franges mesurée est décrit dans l'Annexe G.1.

Pour certaines hypothèses données ci-dessous, l'équation (C.2) peut être liée à l'équation (1b) de la manière suivante:

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

A first acquisition is made by moving the mirror of the interferometer arm and recording the intensity of the light. From the obtained fringe pattern for one selected SOP the PMD delay can be calculated as described in C.1.3. A typical example of a fringe pattern for random polarization mode coupling is shown in Figure C.3. The fringe pattern shall be a smooth Gaussian spectrum representative of an ideal random mode coupling.

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

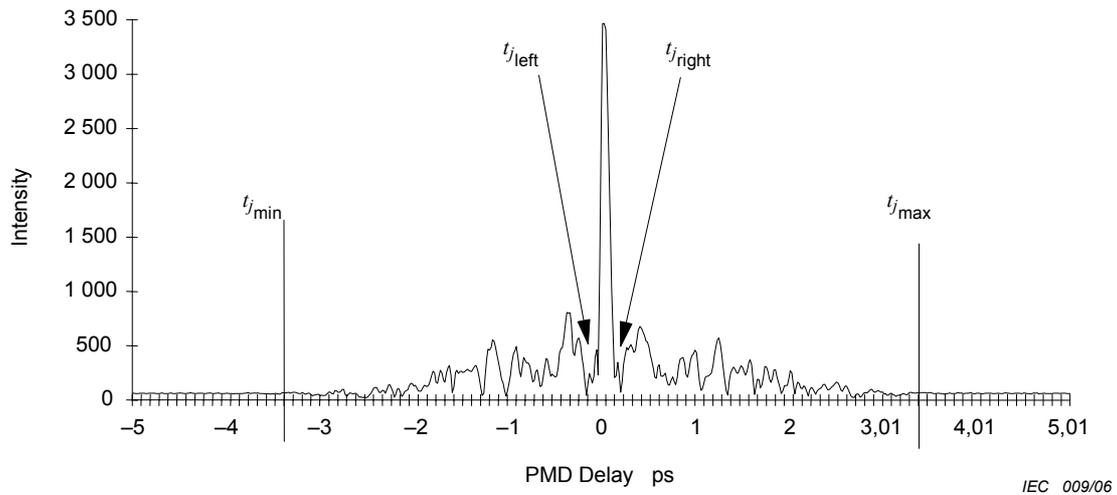


Figure C.3 – Typical data obtained by Method C (TINTY)

C.1.3 Calculations

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

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

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

where σ_{ε} is the RMS width of the cross-correlation envelope. A detailed algorithm for the calculation from a measured fringe envelope is described in Annex G.1.

For certain assumptions given below, Equation (C.2) can be related to Equation (1b) as:

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

L'équation (C.3) est obtenue à partir de la théorie [9-11] donnée par les hypothèses suivantes (notamment):

- Un couplage de mode aléatoire idéal:

NOTE 1 Couplage aléatoire idéal signifie $L/h \rightarrow \infty$ et un axe de biréfringence distribué uniformément. L est la longueur du dispositif et h est la longueur de couplage de polarisation. Pour un dispositif constitué de N segments biréfringents mis bout à bout de longueur h , cela correspond à $N \rightarrow \infty$ avec des axes distribués uniformément.

NOTE 2 Il est possible de procéder à l'analyse lorsque le couplage est négligeable ou en l'absence de couplage.

- Une source purement gaussienne sans ondulations;

- $PMD \gg \sigma_0$

où σ_0 est la largeur de la moyenne quadratique de l'enveloppe d'autocorrélation;

- Des conditions ergodiques.

NOTE 3 La source étant gaussienne, il faut que le résultat soit une moyenne pondérée des valeurs du retard de groupe différentiel (DGD). La pondération n'est pas spécifiée dans la méthode TINTY, mais elle l'est dans la méthode GINTY. Pour cette raison, la méthode C (TINTY) doit donner un résultat différent pour une durée et une plage de longueurs d'onde données par rapport à une des méthodes qui utilise une pondération rectangulaire. L'hypothèse des conditions ergodiques n'entraîne pas la validité de la relation des valeurs attendues. Dans la pratique, les plages de longueurs d'onde échantillonnées par différentes installations des autres méthodes varieront également et donc les résultats obtenus par ces méthodes seront eux aussi différents.

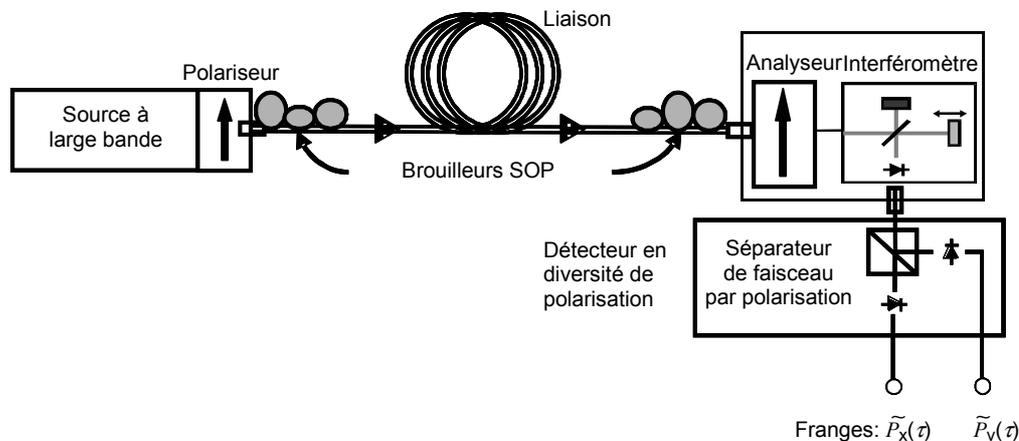
C.2 Analyse générale (GINTY)

La méthode GINTY permet d'éliminer certaines hypothèses nécessaires à l'équation (C.4) de la méthode TINTY. Notamment:

- l'hypothèse de couplage de mode aléatoire idéal n'est pas nécessaire;
- l'hypothèse de source gaussienne n'est pas nécessaire;
- l'hypothèse selon laquelle la PMD est grande par rapport à la largeur de la fonction d'autocorrélation n'est pas nécessaire.

C.2.1 Appareillage

Outre le montage illustré sur la Figure C.2, la Figure C.4 illustre une représentation schématique pour les mesures de liaisons par la méthode C (GINTY).



IEC 010/06

Figure C.4 – Représentation schématique pour la Méthode C (TINTY)

Equation (C.3) is obtained from the theory [9-11] given the following assumptions (notably):

- ideal random mode coupling;

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

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

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

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

- ergodic conditions.

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

C.2 General analysis (GINTY)

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

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

C.2.1 Apparatus

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

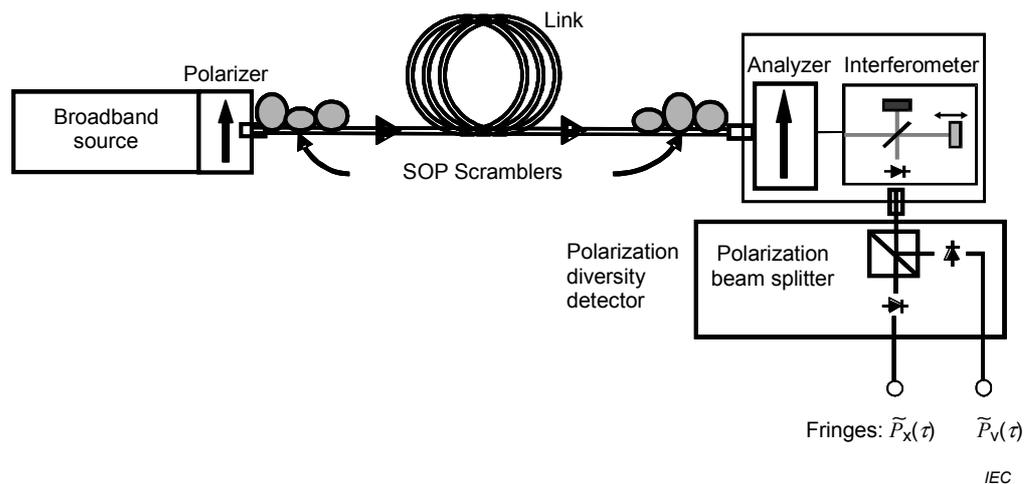


Figure C.4 – Schematic diagram for Method C (GINTY)

Lorsque la méthode C (GINTY) utilise le montage illustré sur la Figure C.4, on obtient les deux interférogrammes P_x et P_y . Ces deux interférogrammes correspondent à deux configurations de l'analyseur orthogonal utilisant le montage de la Figure C.1. Les brouilleurs de polarisation permettent de rendre aléatoire à la fois l'état de polarisation (SOP) en entrée et la base des deux états effectifs de l'analyseur de sortie. Les «franges» illustrées sur la Figure C.4 correspondent aux parties «courant alternatif» des interférogrammes idéaux, qui peuvent également être obtenues à partir du montage de la Figure C.1 pour une paire donnée de configurations de l'analyseur de base et du polariseur d'entrée. La somme et la différence de ces deux matrices de franges sont élevées au carré pour obtenir le carré de l'enveloppe des fonctions d'autocorrélation et de corrélation croisée.

C.2.1.1 Source lumineuse

On utilise une source de lumière à large bande qui émet un rayonnement aux longueurs d'onde de mesure prévues, telle qu'une diode électroluminescente (DEL) ou une source superfluorescente. La longueur d'onde centrale doit se situer dans la fenêtre 1 310 nm ou 1 550 nm ou toute autre fenêtre concernée. Aucune exigence n'est nécessaire pour le spectre de la source.

C.2.1.2 Polariseurs/brouilleurs

Physiquement, le brouillage des états de polarisation (SOP) consiste à insérer des polariseurs pouvant être commandés, un au niveau de l'entrée et un au niveau de la sortie du dispositif en essai, de telle sorte que différents états de polarisation (SOP) en entrée et axes de l'analyseur sont définis pour un balayage de l'interféromètre. Plusieurs états de polarisation (SOP) en entrée et en sortie peuvent être sélectionnés pour obtenir une enveloppe interférométrique plus complète (la moyenne des carrés de l'enveloppe) que dans le cas d'une configuration à un seul état de polarisation (SOP) en entrée et en sortie. Bien qu'une mesure obtenue à partir d'une seule configuration soit possible, elle ne nécessite pas de brouilleur, la mise en œuvre de plusieurs configurations améliore la précision du résultat pour une valeur de PMD égale, par exemple, au résultat de la méthode B. Plusieurs configurations d'analyseur pourraient également être utilisées pour obtenir plusieurs configurations (voir C.2.1.3). Conceptuellement, le processus de brouillage peut être perçu de la manière suivante:

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

Un ensemble de combinaisons d'axes de l'analyseur et d'états de polarisation (SOP) en entrée sera représenté par un état de polarisation (SOP) en entrée et en sortie (I/O-SOP). Ce processus a pour objectif d'obtenir la moyenne des carrés de l'enveloppe sur des états de polarisation (SOP) en entrée et en sortie distribués uniformément. Dans la pratique, il existe différentes façons d'atteindre cet objectif comme cela est présenté ci-dessous.

C.2.1.2.1 L'ensemble de Mueller à 9 états

La somme des 9 carrés des enveloppes observées avec 9 états de polarisation (SOP) en entrée et en sortie spécifiques est rigoureusement égale à la moyenne des carrés de l'enveloppe brouillée uniformément. Ces 9 états de polarisation (SOP) en entrée et en sortie sont: 3 axes d'analyseur formant un trièdre à angle droit, pour chacun des 3 états de polarisation (SOP) en entrée formant également un trièdre à angle droit.

When Method C (GINTY) uses the set-up shown in Figure C4, two interferograms, P_x and P_y , are obtained. These two interferograms correspond to two orthogonal analyzer settings using the setup of Figure C1. The polarization scramblers allow randomizing both the input SOP and the base of the two effective output analyzer states. The “fringes” shown in Figure C.4 correspond to the “a.c.” parts of the idealized interferograms, which could also be obtained from the setup of Figure C.1 for a given pair of input polarizer and base analyzer settings. The sum and difference of these two fringe arrays are squared to obtain the squared envelope of the auto-correlation and cross correlation functions.

C.2.1.1 Light source

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

C.2.1.2 Polarizers/scramblers)

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

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

One set of input-SOP/analyzer axis combination will be labelled as one I/O-SOP. The aim is to get the mean squared envelope averaged over uniformly distributed I/O-SOPs. In practice, there exist a number of possible ways to achieve this goal as shown below.

C.2.1.2.1 The 9-states Mueller set

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

C.2.1.2.2 Brouillage aléatoire

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

C.2.1.3 Séparateur de faisceau par polarisation

Un séparateur de faisceau par polarisation (PBS) peut être utilisé pour obtenir des interférogrammes à partir des états de polarisation (SOP) en sortie orthogonaux (opposés sur la sphère de Poincaré) pour la même combinaison d'états de polarisation (SOP) en entrée et en sortie. Ces deux interférogrammes permettent de calculer l'autocorrélation et la corrélation croisée comme des fonctions distinctes. Associé au système de détection, le séparateur de faisceau par polarisation (PBS) forme un système de détection en diversité de polarisation. Il est possible d'utiliser des moyens autres que le séparateur de faisceau par polarisation pour obtenir ces interférogrammes à partir des états de polarisation (SOP) en sortie orthogonaux.

Les deux motifs de franges observés avec deux axes d'analyseur orthogonaux (opposés sur la sphère de Poincaré) peuvent être utilisés pour calculer les enveloppes d'autocorrélation et de corrélation croisée comme suit:

Enveloppe d'autocorrélation pour un seul état de polarisation (SOP) en entrée et en sortie:

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

Enveloppe de corrélation croisée pour un seul état de polarisation (SOP) en entrée et en sortie:

$$E_x(\tau) = \left| \tilde{P}_x(\tau) - \tilde{P}_y(\tau) \right| \tag{C.4b}$$

C.2.1.4 Interféromètre

L'interféromètre doit être soit en espace libre, soit fibré. Utiliser un type Michelson, situé au niveau de l'extrémité du détecteur d'une liaison en essai.

C.2.2 Procédure

C.2.2.1 Étalonnage

L'équipement est étalonné selon C.1.2.1.

C.2.1.2.2 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.2.1.3 Polarization beam splitter

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

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

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

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

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

$$E_x(\tau) = \left| \tilde{P}_x(\tau) - \tilde{P}_y(\tau) \right| \quad (\text{C.4b})$$

C.2.1.4 Interferometer

The interferometer shall be an air type or a fibre type. Use a Michelson type, located at the detector end of the link under test.

C.2.2 Procedure

C.2.2.1 Calibration

The equipment is calibrated following C.1.2.1.

C.2.2.2 Procédure d'essai

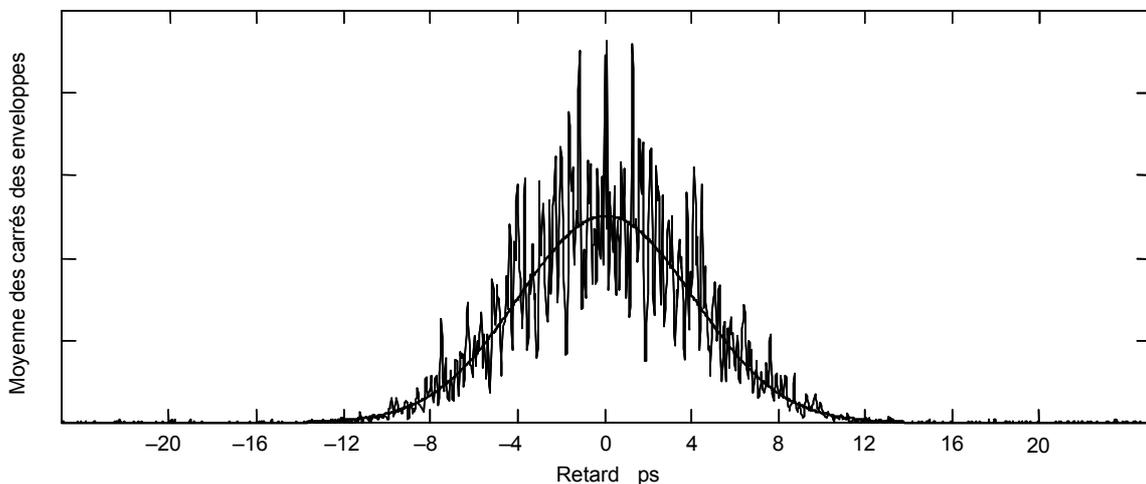
Dans le cas de la configuration utilisée dans la Figure C.2, une extrémité de la liaison est couplée à la sortie polarisée de la source de lumière polarisée. L'autre extrémité est couplée à l'entrée de l'interféromètre. Lorsque la configuration illustrée sur la Figure C.4 est utilisée, une extrémité de la liaison est couplée à la sortie de la combinaison du brouilleur et du polariseur. L'autre extrémité est couplée à l'entrée de la combinaison du brouilleur et du polariseur. Ceci peut être réalisé au moyen de connecteurs à fibres normaux, d'épissures ou par un système d'alignement de fibre. Si ce dernier est utilisé, il convient d'appliquer une petite quantité d'huile adaptatrice d'indice au niveau des raccords pour éviter les problèmes de réflexion.

La puissance de sortie optique de la source de lumière est réglée à une valeur de référence caractéristique pour le système de détection utilisé. Pour obtenir un contraste de frange suffisant, la puissance optique doit être pratiquement la même dans les deux bras de l'interféromètre.

Une première acquisition est réalisée en déplaçant le miroir du bras de l'interféromètre et en enregistrant l'intensité de la lumière. À partir du motif de franges obtenu pour une combinaison d'états de polarisation (SOP) en entrée et en sortie ou à partir d'un brouillage d'états de polarisation (SOP) en entrée et en sortie, le retard de PMD peut être calculé comme décrit en C.2.3. Des exemples typiques de moyenne des carrés des enveloppes de corrélation croisée pour des couplages de mode de polarisation aléatoires et mélangés représentant des applications de liaison sont illustrés sur les Figures C.5 et C.6 respectivement:

- Figure C.5: Couplage de mode aléatoire, $L/h = 100$, $PMD = 4,94$ ps, $\sigma_A = 50$ fs, $PMD/\sigma_A \sim 100$

NOTE La courbe lissée représentée sur la Figure C.5 est uniquement représentée pour faciliter la lecture: l'analyse ne porte pas sur la courbe lissée, ni sur aucun type d'ajustement.



IEC 011/06

Figure C.5 – Données de couplage de mode aléatoire typiques obtenues par la Méthode C (GINTY)

- Figure C.6: Couplage de mode mélangé, enveloppe quasiment plane; la définition de L/h perd son importance; le dispositif en essai est constitué d'une section de couplage de mode aléatoire avec $L/h = 10$ et d'une section de couplage de mode négligeable avec $DGD = PMD_{Random}/4$, $PMD = 9,97$ ps, $\sigma_A = 50$ fs

NOTE La courbe lissée représentée sur la Figure C.6 est uniquement représentée pour faciliter la lecture: l'analyse ne porte pas sur la courbe lissée, ni sur aucun type d'ajustement.

C.2.2.2 Routine operation

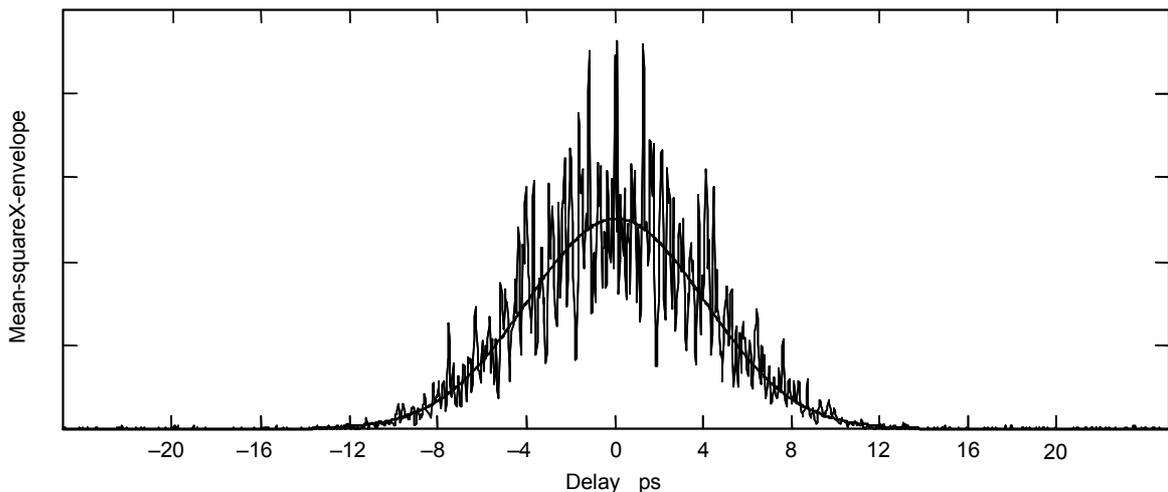
In the case of the set-up used as in Figure C.2, one end of the link is coupled to the polarized output of the polarized light source. The other end is coupled to the interferometer input. When the set-up shown in Figure C.4 is used, one end of the link is coupled to the output of the scrambler-polarizer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

A first acquisition is made by moving the mirror of the interferometer arm and recording the intensity of the light. From the obtained fringe pattern for one I/O-SOP combination or from I/O-SOP scrambling the PMD delay can be calculated as described in C.2.3. Typical examples of mean squared cross-correlation envelopes for random and mixed polarization mode couplings representative of link applications are shown in Figures C.5 and C.6 respectively:

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

NOTE Smoothing shown in Figure C.5 is only used as a visual guide: analysis is neither performed on the smoothing nor any kind of fit.



IEC 011/06

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

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

NOTE Smoothing shown in Figure C.6 is only used as a visual guide: analysis is neither performed on the smoothing nor any kind of fit.

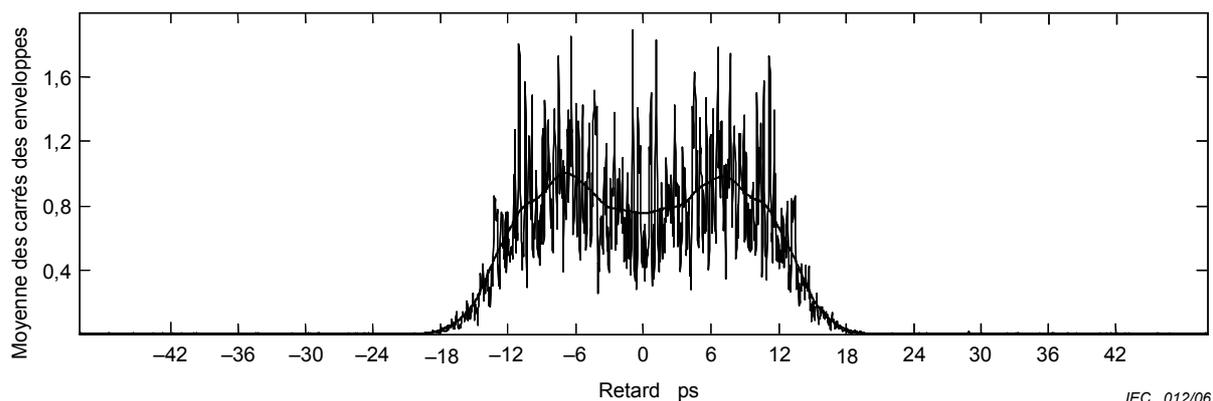


Figure C.6 – Données de couplage de mode mélangé typiques obtenues par la Méthode C (GINTY)

C.2.3 Calculs

Les calculs suivants conviennent à n'importe quel régime de couplage de mode associé aux liaisons.

La détermination de la PMD est basée sur les carrés des enveloppes des interférogrammes d'autocorrélation et de corrélation croisée.

Premièrement, les enveloppes $E_{0i}(\tau)$ et $E_{xi}(\tau)$ de C.4 sont formées à partir de paires d'interférogrammes de N rangées, une pour chaque combinaison d'états de polarisation (SOP) en entrée et en sortie (représentés par i). Deuxièmement, les carrés des enveloppes $E_{0i}^2(\tau)$ et $E_{xi}^2(\tau)$ sont formés. Troisièmement, la moyenne des carrés des enveloppes est calculée comme suit:

$$\bar{E}_0^2(\tau) = \frac{1}{N} \sum_i E_{0i}^2(\tau) \quad \bar{E}_x^2(\tau) = \frac{1}{N} \sum_i E_{xi}^2(\tau) \quad (C.5)$$

Quatrièmement, la largeur de la moyenne quadratique des deux moyennes des carrés des enveloppes échantillonnées σ_0 et σ_x , respectivement, est calculée. Un algorithme d'échantillonnage pour ce calcul est donné à l'Article G.2. Les définitions idéales de ces largeurs sont:

$$\sigma_0^2 = \frac{\int \tau^2 \langle E_0^2(\tau) \rangle d\tau}{\int \langle E_0^2(\tau) \rangle d\tau} \quad (C.6a)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{\int \tau^2 \langle E_x^2(\tau) \rangle d\tau}{\int \langle E_x^2(\tau) \rangle d\tau} \quad (C.6b)$$

L'opérateur de valeur attendue dans les équations ci-dessus est donné pour un échantillonnage aléatoire et uniforme des états de polarisation (SOP) en entrée et en sortie.

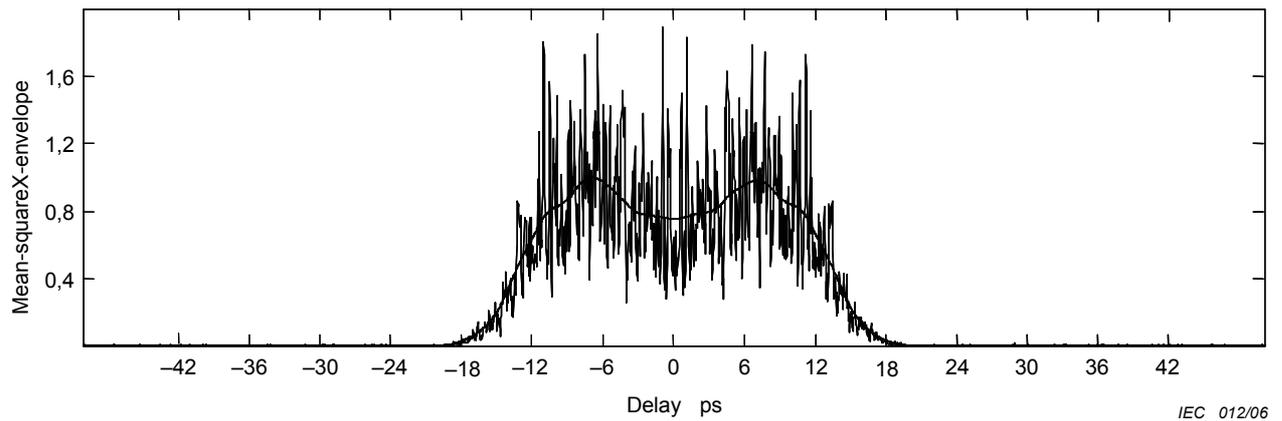


Figure C6 – Typical mixed-mode-coupling data obtained by Method C (GINTY)

C.2.3 Calculations

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

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

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

$$\bar{E}_0^2(\tau) = \frac{1}{N} \sum_i E_{0i}^2(\tau) \quad \bar{E}_x^2(\tau) = \frac{1}{N} \sum_i E_{xi}^2(\tau) \quad (\text{C.5})$$

Fourth, calculate the RMS width of the two sampled mean squared envelopes σ_0 and σ_x , respectively. A sample algorithm for this calculation is given in Annex G.2. The ideal definitions of these widths are:

$$\sigma_0^2 = \frac{\int \tau^2 \langle E_0^2(\tau) \rangle d\tau}{\int \langle E_0^2(\tau) \rangle d\tau} \quad (\text{C.6a})$$

$$\sigma_x^2 = \frac{\int \tau^2 \langle E_x^2(\tau) \rangle d\tau}{\int \langle E_x^2(\tau) \rangle d\tau} \quad (\text{C.6b})$$

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

La valeur PMD_{RMS} obtenue est:

$$PMD_{RMS} = \left[\frac{3}{2} (\sigma_x^2 - \sigma_0^2) \right]^{1/2} \quad (C.7)$$

L'équation (C.7) est liée à l'équation (1b) de la manière suivante [12]:

$$\frac{\int \Delta \tau^2(\nu) S_0^2(\nu) d\nu}{\int S_0^2(\nu) d\nu} = \frac{3}{2} (\sigma_x^2 - \sigma_0^2) \quad (C.8)$$

En considérant les définitions idéales des termes de la largeur de la moyenne quadratique à partir des équations (C.6a) et (C.6b), l'équation (C.8) est exacte pour n'importe quelle courbe de retard de groupe différentiel (DGD) présente au moment de la mesure et quelles que soient les caractéristiques spectrales de la source. La partie gauche de l'équation (C.8) est un calcul de la moyenne quadratique pondérée sur le spectre (par le carré de la puissance).

En utilisant l'hypothèse des conditions ergodiques:

$$\langle \Delta \tau^2 \rangle = \left\langle \frac{\int \Delta \tau^2(\nu) S_0^2(\nu) d\nu}{\int S_0^2(\nu) d\nu} \right\rangle \quad (C.9)$$

The PMD_{RMS} value that is reported is:

$$PMD_{RMS} = \left[\frac{3}{2} (\sigma_x^2 - \sigma_0^2) \right]^{1/2} \quad (C.7)$$

Equation (C.7) relates to Equation (1b) as follows [12]:

$$\frac{\int \Delta \tau^2(\nu) S_0^2(\nu) d\nu}{\int S_0^2(\nu) d\nu} = \frac{3}{2} (\sigma_x^2 - \sigma_0^2) \quad (C.8)$$

Using the ideal definitions of the RMS width terms from Equations (C.6a) and (C.6b), Equation (C.8) is exact for any DGD curve present at the time of measurement and any source spectral characteristic. The left side of Equation (C.8) is a spectrally weighted (by squared power) RMS calculation.

Using the assumption of ergodic conditions:

$$\langle \Delta \tau^2 \rangle = \left\langle \frac{\int \Delta \tau^2(\nu) S_0^2(\nu) d\nu}{\int S_0^2(\nu) d\nu} \right\rangle \quad (C.9)$$

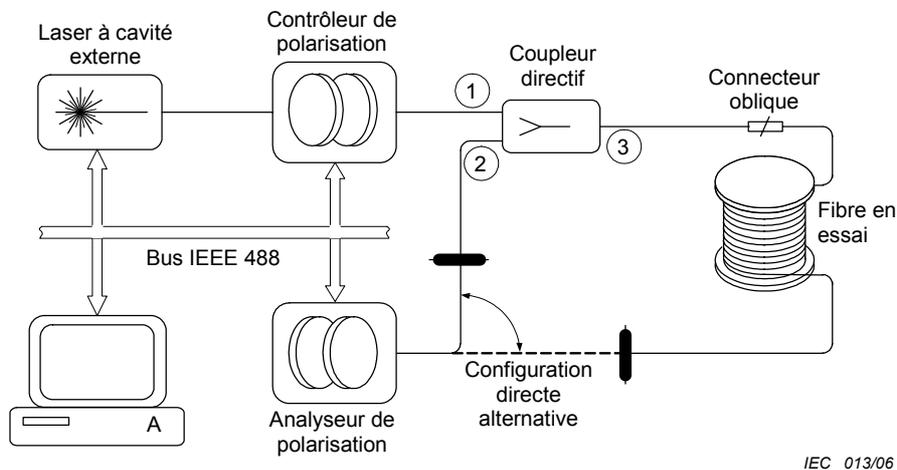
Annexe D (normative)

Méthode d'évaluation des paramètres de Stokes utilisant la lumière rétro-réfléchi

La présente annexe contient des exigences détaillées pour effectuer des mesures de PMD par la Méthode D – Évaluation des paramètres de Stokes utilisant la lumière rétro-réfléchi. On a montré que cette méthode donne des résultats appropriés aux liaisons pouvant atteindre 40 km – sans amplificateur.

D.1 Appareillage

La Figure D.1 représente une disposition de l'appareillage.



IEC 013/06

Figure D.1 – Disposition pour la Méthode D

La plupart des éléments de l'appareillage sont identiques à ceux de la méthode B. Les autres éléments sont décrits ci-dessous.

D.1.1 Coupleur directif

Le coupleur directif couple la lumière de la source dans la liaison et la lumière réfléchi par l'extrémité distante de la liaison dans l'analyseur de polarisation. Ce coupleur doit présenter une faible dispersion de mode de polarisation (PMD) (0,1 ps), de faibles pertes dépendant de la polarisation (PDL) (0,1 dB) et un faible affaiblissement d'adaptation (supérieur à 50 dB) et il doit être stable pendant la mesure.

D.1.2 Connecteur oblique

Ce connecteur doit présenter un affaiblissement d'adaptation supérieur à 50 dB pour éviter un mélange des signaux au niveau de l'analyseur de polarisation. Le cordon de connexion entre le coupleur et le connecteur oblique doit rester stable pendant la mesure.

Annex D (normative)

Stokes parameter evaluation method using back-reflected light

This annex contains detailed requirements for completing PMD measurements using the Stokes parameter evaluation on back-reflected light – Method D. This method has been shown to yield suitable results for links up to 40 km – without amplifiers.

D.1 Apparatus

Figure D1 shows a layout of the apparatus.

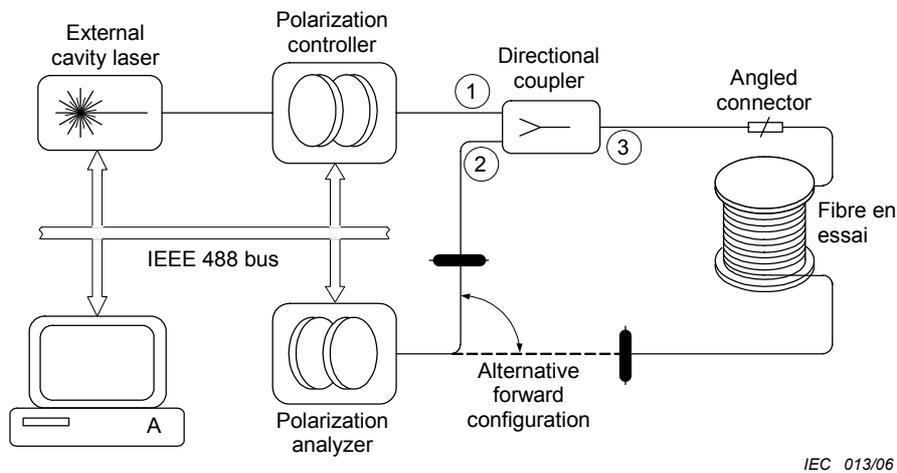


Figure D.1 – Layout for Method D

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

D.1.1 Directional coupler

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

D.1.2 Angled connector

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

D.1.3 Terminaison de l'extrémité distante

L'extrémité distante de la longueur d'onde doit réfléchir suffisamment de lumière vers le polarimètre pour détecter les états de polarisation (SOP) en sortie. Il peut être nécessaire de préparer une coupe lisse au niveau de l'extrémité perpendiculaire à l'axe de la fibre.

D.2 Procédure

La procédure pour la méthode D est identique à celle de la méthode B, sauf que l'extrémité d'entrée de la liaison est une entrée et une sortie pour l'équipement de mesure. En outre, le connecteur oblique situé au niveau de l'extrémité d'entrée de la liaison et l'extrémité de réflexion au niveau de l'extrémité de sortie de la liaison requièrent une préparation spéciale.

D.3 Calcul et interprétation des résultats

Le calcul du retard de groupe différentiel (DGD) pour une longueur d'onde donnée est identique à celui de la méthode B. La seule différence est que moyenne de ces valeurs de retard de groupe différentiel (DGD) n'est pas la valeur de la PMD de la liaison. Définir $\langle \Delta \tau_B \rangle$ comme la moyenne des mesures des retards de groupe différentiel (DGD) rétro-réfléchis. La PMD (ps) de la liaison pour la zone de longueur d'onde mesurée est donnée par:

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

D.1.3 Far-end termination

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

D.2 Procedure

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

D.3 Calculation and interpretation of results

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

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

Annexe E (normative)

Méthode du déphasage par modulation

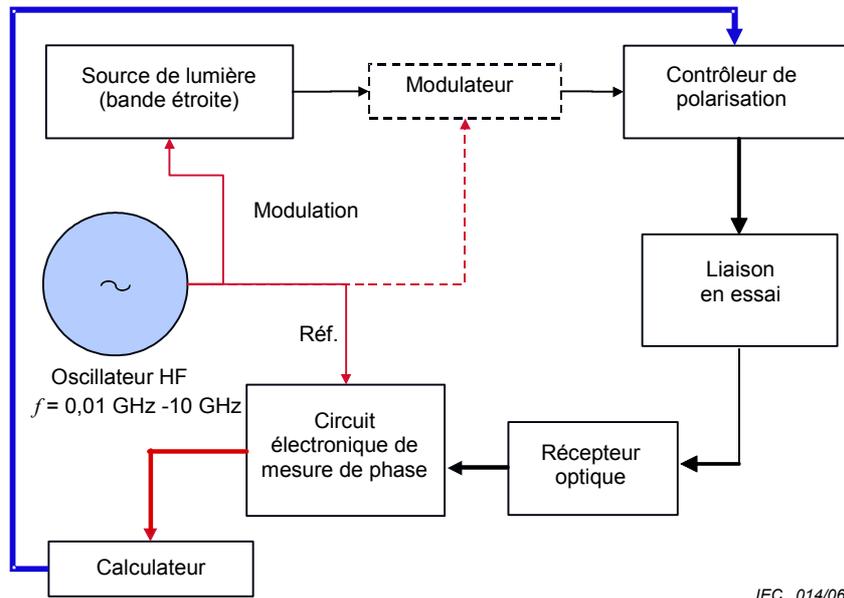
Cette annexe contient les exigences spécifiques à la méthode E, Méthode du déphasage par modulation.

E.1 Appareillage

Deux techniques principales sont disponibles:

- une est basée sur une recherche complète des états de polarisation (SOP) en entrée,
- une est basée sur la mesure des états de polarisation (SOP) en sortie associée à un ensemble de Mueller d'états de polarisation (SOP) en entrée.

La technique de recherche complète peut être mise en œuvre avec un seul contrôleur de polarisation ou avec un modulateur de polarisation associé à un contrôleur. La Figure E.1 représente une disposition du contrôleur seul et les connexions nécessaires au contrôle du chemin de référence de phase. La Figure E.2 représente une disposition dans le cas de la modulation de la polarisation. L'appareillage de la Figure E.1 est suffisant pour effectuer la technique de l'ensemble de Mueller.



IEC 014/06

Figure E.1 – Appareillage de base

E.1.1 Sources de lumière

Pour mesurer le retard de groupe différentiel (DGD) pour chaque longueur d'onde spécifiée, il convient d'utiliser plusieurs diodes laser, des lasers accordables ou des diodes électroluminescentes filtrées par un monochromateur ou d'autres filtres. Dans le cas d'un système de mesure de longueur d'onde arithmique, la sélection de l'appareillage d'essai repose sur la détermination de la taille d'échelon de la mesure basée sur le spectre du dispositif en essai, suivi de la sélection de la largeur de raie de la source en respectant le critère de Nyquist, basée sur la taille d'échelon.

Annex E (normative)

Modulation phase-shift method

This annex contains requirements specific to Method E, modulation phase-shift method.

E.1 Apparatus

Two primary techniques are available:

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

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

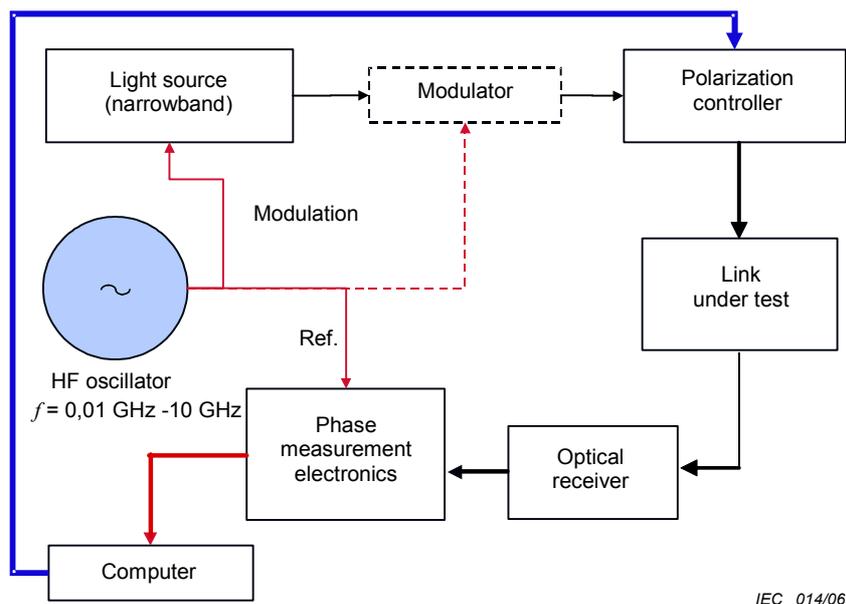


Figure E.1 – Basic apparatus

E.1.1 Light source(s)

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

E.1.1.1 Diodes laser

Le spectre de la source laser, y compris la longueur d'onde centrale et la phase de sortie modulée doit être stable sur la période de temps de mesure pour le courant de polarisation, la fréquence de modulation et la température de la diode rencontrés.

Les diodes laser longitudinales unimodales avec contrôle de la température et stabilisation de la puissance de sortie conviennent normalement aux fibres optiques unimodales.

E.1.1.2 Diodes électroluminescentes filtrées

Utiliser une ou plusieurs diodes électroluminescentes (DEL). Le spectre de la DEL, y compris la longueur d'onde centrale et la phase de sortie modulée doit être stable sur la période de temps de la mesure pour le courant de polarisation, la fréquence de modulation et la température de la DEL rencontrés.

Filtrer le spectre optique de la DEL pour obtenir une largeur de raie (largeur à mi-hauteur) dans la plage comprise entre 1 nm et 5 nm. Un monochromateur peut être utilisé pour filtrer ou sélectionner la longueur d'onde.

E.1.1.3 Diodes laser accordables

Utiliser une ou plusieurs diodes laser accordables. Le spectre du laser, y compris la longueur d'onde centrale et la phase de sortie modulée de chaque laser pour chaque longueur d'onde utilisée doit être stable sur la période de temps de mesure pour le courant de polarisation, la fréquence de modulation et la température de la diode rencontrés. On utilise normalement des lasers à cavité externe contrôlés en température entièrement autonome.

E.1.2 Modulation

Moduler l'intensité des sources de lumière pour produire une forme d'onde comprenant une seule composante dominante de Fourier. La fréquence de la modulation doit être suffisamment élevée et suffisamment stable pour garantir une mesure de précision adéquate.

La modulation peut être obtenue par injection directe (interne) de courant dans la diode laser ou la DEL. Il est également possible d'utiliser d'autres formes (externes) de moyen de modulation. Les exemples sont des dispositifs de modulation électro-optiques placés après le laser (se reporter à la Figure E.1) pour moduler la lumière avant qu'elle passe dans la liaison. Le modulateur doit être suffisamment stable pour garantir une mesure de précision adéquate.

Une modulation sinusoïdale, trapézoïdale ou carrée est acceptable. Normalement, une stabilité de fréquence de 0,01 ppm est suffisante.

Elle est essentielle pour empêcher les ambiguïtés de $2\pi n$ radians (n est un nombre entier) dans le cadre de la mesure du déphasage. Pour cela, il est possible, par exemple, de réduire la fréquence du modulateur pour les grands coefficients de la PMD.

Par exemple, la fréquence de modulation doit être choisie inférieure à la fréquence qui donne un déphasage différentiel de 2π . Cette fréquence limite peut être estimée par l'équation suivante:

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

où DGD_{\max} est la valeur attendue du retard de groupe différentiel (DGD) typique maximal, en ps.

E.1.1.1 Laser diodes

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

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

E.1.1.2 Filtered light emitting diodes

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

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

E.1.1.3 Tuneable diode lasers

Use one or more tuneable diode lasers. The laser spectrum including the centre wavelength and modulated output phase of each laser at each wavelength used shall be stable over the measurement time period at the bias current, modulation frequency and diode temperature encountered. Typically completely self-contained temperature-controlled external-cavity laser units may be employed.

E.1.2 Modulation

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

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

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

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

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

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

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

En fait, pour des valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) typiques inférieures à 100 ps, $f_{\max} > 10$ GHz dépasse généralement les fréquences pratiques maximales pouvant être générées ou utilisées.

La modulation à la fréquence f donnera des bandes latérales à $\pm f$ de chaque côté de la longueur d'onde centrale de la source, et dans le cas de certaines liaisons à bande très étroite, elle peut entraîner une limitation. Pour garantir une mesure de phase précise, la largeur de bande occupée totale, y compris les bandes latérales de la modulation et la largeur de raie de la source elle-même doit être inférieure ou égale à la largeur de bande de la liaison. On choisit normalement la fréquence f qui convient aux circuits électroniques de détection de phase, sans dépasser les limites imposées par la largeur de bande du dispositif. Typiquement f est dans la plage comprise entre 10 MHz et 10 GHz.

La répétabilité de la moyenne quadratique de la mesure du retard de groupe différentiel (DGD), définie ici comme DGD_{\min} , définit une fréquence de modulation minimum f_{\min} qui doit être utilisée. La fréquence f_{\min} est déterminée par la résolution de phase $\delta\phi$ du détecteur de phase comme suit:

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

où

DGD_{\min} est la valeur de la répétabilité de la moyenne quadratique du retard de groupe différentiel (DGD) (ps)

$\delta\phi$ est la moyenne quadratique de la résolution de phase du détecteur de phase

E.1.3 Contrôle de la polarisation

L'état de polarisation (SOP) en entrée du dispositif en essai est contrôlé à l'aide d'un contrôleur de polarisation. L'état de polarisation (SOP) est sélectionné à l'aide d'un signal de contrôle provenant du calculateur. Le calculateur sélectionne des états de polarisation (SOP) connus et distincts appropriés tels que des états de polarisation (SOP) orthogonaux, et mesure les retards différentiels entre ces états de polarisation (SOP) en conséquence.

Le contrôleur de polarisation est utilisé pour fournir la lumière polarisée d'un ensemble d'états de polarisation (SOP) à l'entrée du dispositif en essai. Si les sources de lumière ne sont pas déjà polarisées, le contrôleur de polarisation doit contenir un polariseur à son entrée. L'état de polarisation (SOP) est contrôlé par des éléments biréfringents variables qui suivent le polariseur. Des exemples de contrôleur de polarisation sont, entre autres, des lames à retard à cristaux liquides, des boucles de fibres biréfringentes déplacées mécaniquement ou des dispositifs à cristaux électro-optiques.

E.1.4 Optique d'entrée et optique de sortie

Coupler la sortie de la source de lumière à l'entrée de la liaison et la sortie de la liaison à l'entrée du système de détection, de telle sorte que les longueurs des chemins optiques et physiques pour chaque source soient constants pendant la période de mesure. (Cela garantit que la phase différentielle entre les états de polarisation (SOP) ne varie pas avec un changement de longueur de n'importe quel chemin.) Des dispositifs de couplage appropriés peuvent comprendre des commutateurs optiques unimodaux ou des connecteurs optiques démontables, mais on utilise généralement des épissures par fusion. Les dispositifs choisis doivent présenter des valeurs maximales de retard de groupe différentiel (DGD), de perte dépendant de la polarisation (PDL) et de retard de groupe les plus petites possibles dans la plage de longueurs d'onde de mesure.

NOTE Pour les mesures des fibres d'étalonnage, il faut remplacer «liaison» par «fibre d'étalonnage».

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

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

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

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

where

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

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

E.1.3 Polarization control

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

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

E.1.4 Input and output optics

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

NOTE For calibration fibre measurements, replace “link” with “calibration fibre.”

Les conducteurs des fibres, les fibres amorces et autres composants optiques situés dans le chemin optique après le contrôleur doivent présenter des valeurs maximales de retard de groupe différentiel (DGD), de perte dépendant de la polarisation (PDL) et de retard de groupe les plus petites possibles dans la plage de longueurs d'onde de mesure. Ces facteurs ajouteront une incertitude supplémentaire à la détermination du retard de groupe différentiel (DGD) de la liaison.

La sélection des états de polarisation (SOP) est normalement contrôlée par un calculateur et la mesure de la phase relative pour les états de polarisation (SOP) doit être suffisamment rapide pour que le résultat n'ait pas un effet négatif en raison de la dérive de la température du retard dans les conducteurs de fibre.

Le balayage des états de polarisation (SOP) injectés permet de déterminer le retard de groupe différentiel (DGD) comme la phase différentielle maximale. Les calculateurs/détecteurs de phase peuvent être installés de différentes manières. Deux exemples d'installation sont présentés ci-dessous.

Dans le premier exemple, représenté sur la Figure E.1, le calculateur/détecteur de phase enregistre la phase pour un premier état de polarisation (SOP) de l'essai. Le contrôleur de polarisation est réglé sur un autre état de polarisation (SOP). La phase est alors enregistrée pour ce dernier état de polarisation (SOP). Le retard de groupe différentiel (DGD) à la longueur d'onde sélectionnée est déterminé à partir de la différence maximale des mesures de phase.

Dans le deuxième exemple, représenté sur la Figure E.2, un commutateur de polarisation est utilisé pour moduler l'état de polarisation (SOP) de la lumière à l'entrée vers le contrôleur de polarisation. Le commutateur de polarisation peut être constitué d'éléments biréfringents en rotation et d'un modulateur photoélastique ou électro-optique ou d'autres éléments. La polarisation est alternée entre deux états de polarisation (SOP) parfaitement distincts tels qu'une fréquence F de plusieurs dizaines de Hertz, ce qui permet une détection verrouillée d'une sortie de phase différentielle vraie à partir du détecteur de phase (se reporter à E.1.5). Cette «modulation de la polarisation» permet de supprimer efficacement les phénomènes de dérive de la température. Le détecteur de phase génère un signal en courant alternatif, synchrone avec la modulation des états de polarisation (SOP), dont l'amplitude est proportionnelle à la phase différentielle entre les deux états de polarisation (SOP). Ce signal est ensuite démodulé par un amplificateur à verrouillage pour générer un signal en courant continu représentant la phase différentielle. Le retard de groupe différentiel (DGD) à la longueur d'onde sélectionnée est déterminé à partir de la phase différentielle provenant du balayage des états de polarisation (SOP) balayés sur la sphère de Poincaré.

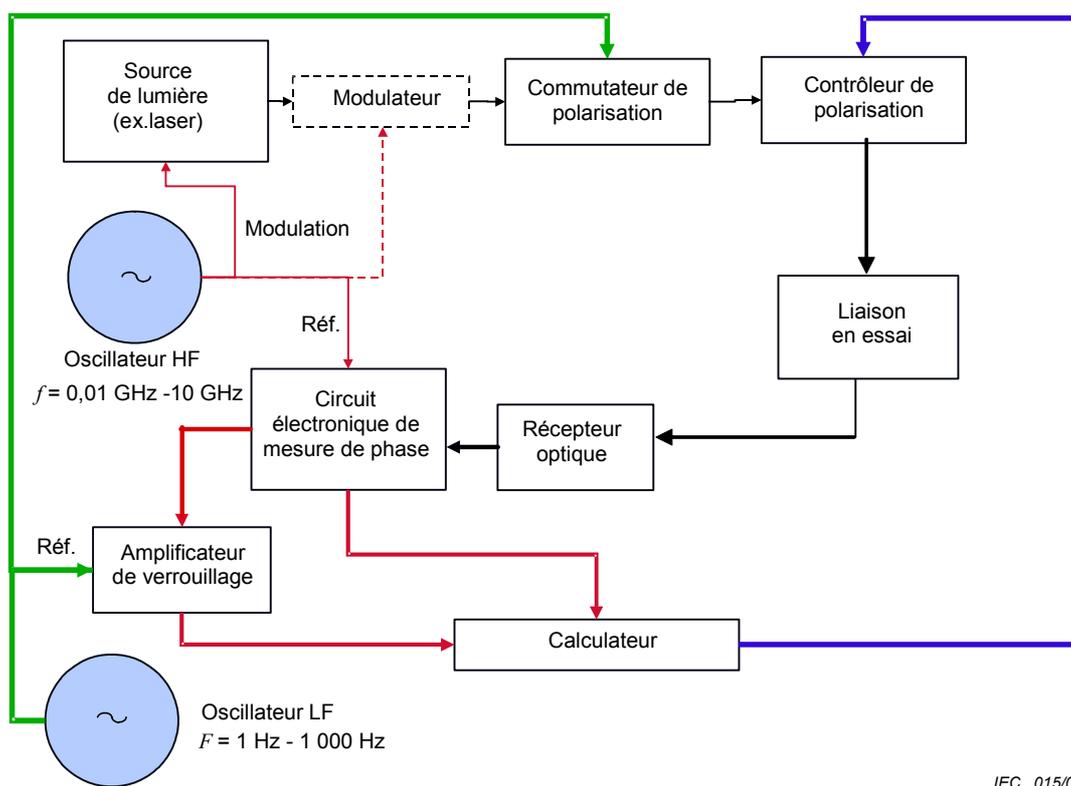
All fibre leads, pigtails and other optical components in the optical path beyond the polarization controller shall exhibit minimal intrinsic maximum DGD, PDL and group delay over the measurement wavelength range. These factors will contribute additional uncertainty in the determination of the DGD of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

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

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

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

In the second example, shown in Figure E.2, a polarization switcher is used to modulate the light SOP at the input to the polarization controller. The polarization switcher may consist of rotating birefringent elements, and electro-optic or photo-elastic modulator, or other elements. The polarization is alternated between two perfectly distinct SOPs such as orthogonal at a frequency, F , of several tens of Hz, allowing lock-in detection of a true differential phase output from the phase detector (see E.1.5). This “polarization modulation” allows efficient removal of thermal drift effects. The phase detector produces an ac signal, synchronous with the SOP modulation, with amplitude proportional to the differential phase between the two SOPs. This signal is subsequently demodulated by a lock-in amplifier to produce a dc signal representing the differential phase. The DGD at the selected wavelength is determined from the maximum differential phase from a scan of the launch SOPs over the Poincaré sphere.



IEC 015/06

Figure E.2 – Disposition de l'appareillage dans le cas de la modulation de la polarisation

E.1.5 Détecteur optique et circuits électroniques de détection de phase

Utiliser un détecteur optique sensible sur toute la plage de longueurs d'onde à mesurer avec un détecteur de phase. Un amplificateur peut être utilisé pour augmenter la sensibilité du système de détection. Un système typique peut inclure une photodiode PIN, un amplificateur à transistors à effet de champ (TEC) et un détecteur sensible à la phase ou un voltmètre vectoriel.

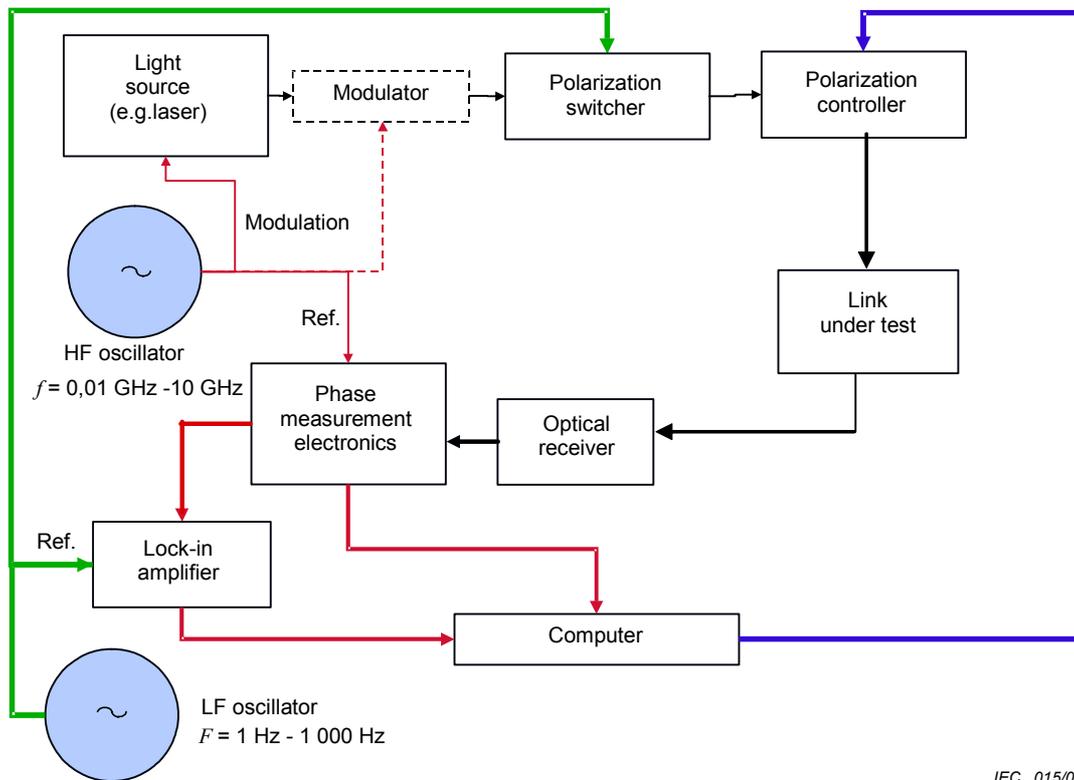
D'autres dispositifs, tels qu'un atténuateur optique variable ou un amplificateur à fibre, peuvent être utilisés pour contrôler la puissance optique reçue. Les dispositifs sont placés en ligne juste avant le détecteur ou le récepteur. Les dispositifs choisis doivent présenter des valeurs maximales de retard de groupe différentiel (DGD), de perte dépendant de la polarisation (PDL) et de retard de groupe les plus petites possibles dans la plage de longueurs d'onde de mesure.

Le détecteur, l'amplificateur et le système de détection de phase ne doivent répondre qu'à la composante fondamentale de Fourier du signal modulant et ils doivent introduire un déphasage du signal constant sur la plage des puissances optiques reçues.

L'unité de détection de phase et le calculateur enregistreront la phase produite par chaque état de polarisation (SOP) et généreront une sortie représentant le relais et la phase différentielle entre les deux états de polarisation (SOP).

E.1.6 Signal de référence

Fournir au détecteur de phase un signal de référence dont la composante fondamentale de Fourier est la même que celle du signal modulant et les phases différentielles des sources de signaux seront mesurées par rapport à ce signal. Le signal de référence doit être synchronisé sur le signal modulant et peut être dérivé du signal modulant.



IEC 015/06

Figure E.2 – Apparatus layout for polarization modulation

E.1.5 Optical detector and phase detection electronics

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

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

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

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

E.1.6 Reference signal

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

Exemples de signaux de référence:

- Lorsque les sources de signaux et le détecteur sont situés au même endroit, par exemple pendant l'étalonnage, on peut utiliser une connexion électrique entre le générateur de signaux et le port de référence de l'unité de détection de phase.
- Un séparateur optique avec un détecteur, inséré avant l'échantillon en essai peut également être utilisé pour les équipements situés au même endroit. La sortie du détecteur est amplifiée et ce signal sert de référence à l'unité de détection de phase.
- Le modulateur optique au niveau de l'entrée peut également être contrôlé depuis l'extrémité de sortie par une voie distincte lorsque le modulateur électrique est situé au même endroit que les circuits électroniques de détection de phase.

E.2 Procédure

E.2.1 Fréquence de modulation

Régler la fréquence de modulation en fonction des valeurs DGD_{max} et DGD_{min} attendues (se reporter à E.1).

E.2.2 Balayage des longueurs d'onde et mesure du retard de groupe différentiel (DGD)

Pour chaque technique, il existe une méthode permettant d'obtenir le retard de groupe différentiel (DGD) pour une longueur d'onde particulière. Balayer la source sur la plage de longueurs d'onde souhaitées et, pour chaque longueur d'onde, mesurer le retard de groupe différentiel (DGD) de la façon décrite ci-dessous.

Une fois le balayage des longueurs d'onde terminé, la valeur de la PMD de la liaison est calculée comme la moyenne des valeurs du retard de groupe différentiel (DGD).

E.2.2.1 Procédure de recherche complète

Pour toute paire d'états de polarisation (SOP) en entrée orthogonaux, il existe une différence de déphasage pour une longueur d'onde donnée. Dans le cadre de cette mesure, le retard de groupe différentiel (DGD) pour la longueur d'onde est obtenu à partir du déphasage maximal pour toute paire d'états de polarisation (SOP) en entrée orthogonaux. On appelle état de polarisation principal (PSP), l'état de polarisation (SOP) de la paire pour laquelle ce maximum se produit.

En général, l'orientation des états de polarisation (SOP) de la liaison n'est pas connue en fonction des axes de polarisation de l'analyseur de l'appareillage d'essai. De plus, les états de polarisation (SOP) de la liaison varient avec le temps et la longueur d'onde. Outre l'incertitude liée à la recherche de ces axes, la principale incertitude porte sur les conducteurs dans l'appareillage lui-même.

Plusieurs stratégies permettent de déterminer le retard de groupe différentiel (DGD) correct entre les états de polarisation (SOP) lorsque les états de polarisation principaux (PSP) eux-mêmes sont arbitraires comme cela est décrit ci-dessus. Dans les méthodes de recherche des états de polarisation (SOP), une source d'incertitude est l'erreur d'alignement des états de polarisation (SOP) en entrée avec les axes principaux vrais. Par exemple, une erreur d'alignement de 5 degrés donnera une incertitude de 0,4 % sur la valeur du retard de groupe différentiel (DGD). Il faut donc contrôler soigneusement l'erreur d'alignement pour la recherche de polarisation.

Examples of reference signals are as follows.

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

E.2 Procedure

E.2.1 Modulation frequency

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

E.2.2 Scan the wavelengths and measure DGD

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

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

E.2.2.1 Full search procedure

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

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

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

Exemples d'installations correctes:

- Utiliser le contrôleur de polarisation, selon la technique «recherche et mesure», pour chaque longueur d'onde de l'essai. Différents algorithmes de recherche peuvent être utilisés pour optimiser la vitesse de mesure. Pour une longueur d'onde donnée, il faut utiliser le contrôleur de polarisation pour balayer l'état de polarisation (SOP) injecté, en enregistrant le déphasage pour chaque état de polarisation (SOP). Lorsque suffisamment d'états de polarisation (SOP) ont été couverts, le déphasage maximal et le déphasage minimal enregistrés correspondront à la lumière injectée dans les états de polarisation principaux (PSP) de la liaison. Le retard de groupe différentiel (DGD) à la longueur d'onde actuelle est alors proportionnel à la différence entre le déphasage maximal et le déphasage minimal (le calcul est présenté en E.3). On appelle cette différence, le déphasage différentiel. La biréfringence des conducteurs agira sur ces états de polarisation (SOP) de telle sorte que l'état de polarisation (SOP) en entrée sur la liaison elle-même sera aligné avec ces deux états de polarisation principaux (PSP) ou axes principaux. Lorsque la phase maximale et la phase minimale ont été détectées, le retard de groupe différentiel (DGD) vrai pour cette longueur d'onde est la différence de retard entre ces deux états de polarisation (SOP).
- Dans le cas de la modulation de la polarisation, (Figure E.2), la méthode «recherche et mesure» peut être adaptée, de telle sorte que lorsque le contrôleur de polarisation est balayé, le déphasage différentiel peut être détecté directement. Cette opération réduit la recherche à la recherche du déphasage différentiel maximal, qui est proportionnel au retard de groupe différentiel (DGD) conformément à l'équation E.3.

La différence de déphasage maximale pour la longueur d'onde est donnée par:

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

où

l'indice i représente les états de polarisation (SOP) en entrée,

$\Delta\phi$, $\Delta\phi'$ sont les déphasages des états de polarisation (SOP) en entrée.

E.2.2.2 Analyse de l'ensemble de Mueller

La façon la plus simple de décrire un ensemble de Mueller d'états de polarisation (SOP) en entrée est d'utiliser une sphère de Poincaré (se reporter à la Figure E.3).

Examples of suitable implementations are as follows.

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

Designate the maximum phase shift difference for the wavelength as:

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

where

the index, i , represents the various input SOPs

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

E.2.2.2 Mueller set analysis

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

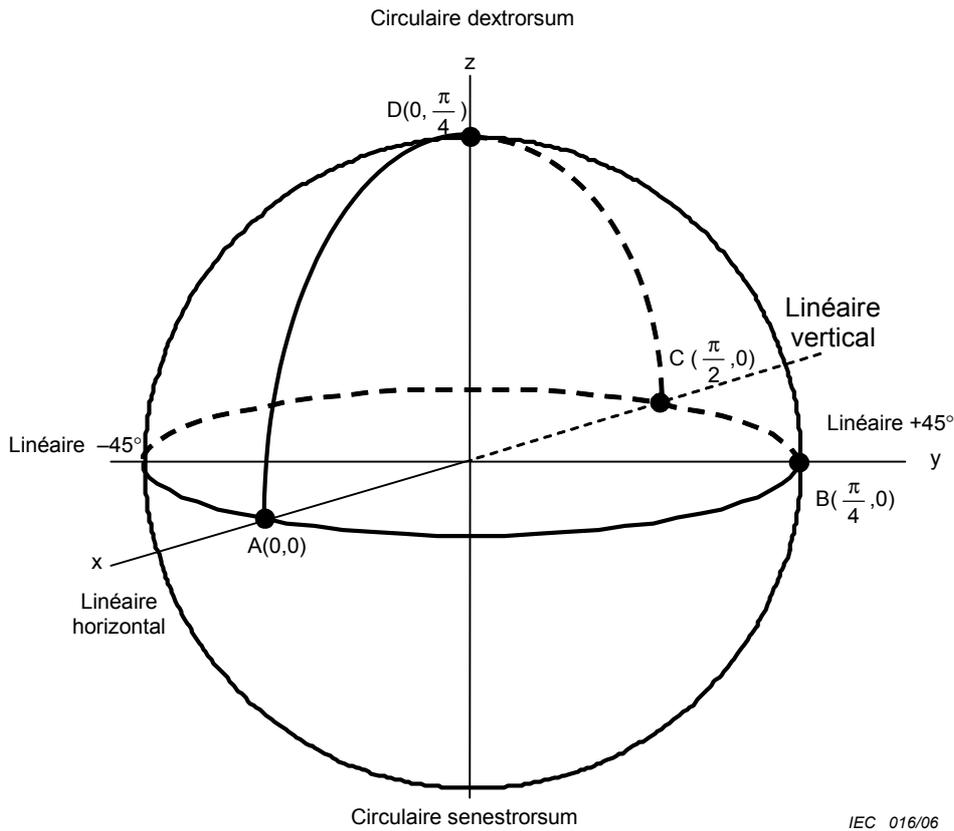


Figure E.3 – États de Mueller sur la sphère de Poincaré

Les états de polarisation (SOP) orthogonaux sont espacés de 180° sur la sphère de Poincaré. Trois des états de polarisation (SOP) sont sur un grand cercle et sont mutuellement séparés de 90° (se reporter à la Figure E.3). En définissant le sens dextrorsum par rapport au «pôle Nord» et en commençant à un point arbitraire A sur le grand cercle, les positions B et C sont déterminées en ajoutant successivement 90°. La position D est orthogonale aux autres points et orientée «vers le haut» en utilisant le sens dextrorsum. Le système de coordonnées sphériques suivant décrit le vecteur de Stokes en entrée normalisé s_0 , dont les paramètres servent à définir un exemple d'un ensemble de Mueller dans lequel le grand cercle est sur l'équateur. Le paramètre θ est l'orientation linéaire du vecteur de Jones normalisé associé j_0 . Le paramètre μ est la différence de phase des éléments x et y de ce vecteur.

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

Tableau E.1 – Exemple d'ensemble de Mueller

Position	θ	μ	Description
A	0	0	Polarisation linéaire à 0° (horizontale)
B	$\pi/4$	0	Polarisation linéaire à 45° (45 °)
C	$\pi/2$	0	Polarisation linéaire à 90° (verticale)
D	$\pi/4$	$\pi/2$	Polarisation circulaire (sphérique)

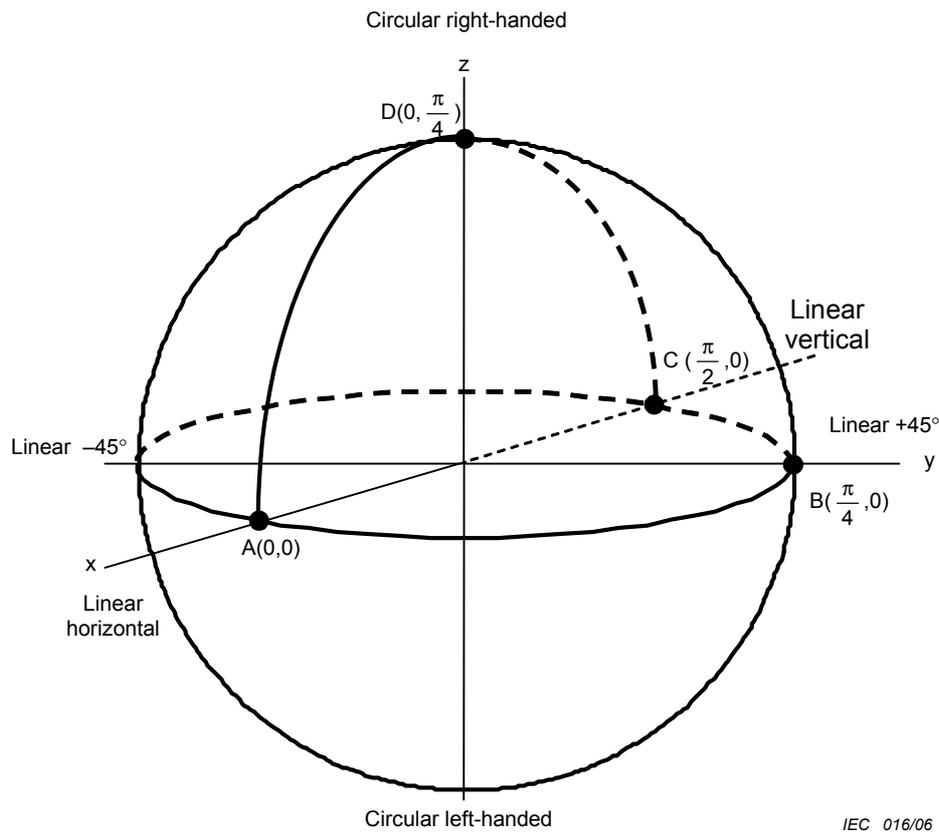


Figure E3 – Mueller states on Poincaré sphere

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

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

Table E.1 – Example of Mueller set

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

Pour chaque longueur d'onde, faire passer le contrôleur de polarisation par les positions A, B, C et D. Pour chaque position, mesurer les déphasages (radians), $\Delta\phi_A(\lambda)$, $\Delta\phi_B(\lambda)$, $\Delta\phi_C(\lambda)$, $\Delta\phi_D(\lambda)$, respectivement. Les calculs utilisant ces quantités sont donnés en E.3.

E.2.3 Étalonnage

Périodiquement (par exemple tous les jours ou toutes les semaines), placer l'appareillage de mesure à un endroit, insérer dans l'appareillage une fibre d'étalonnage de phase, une section longue de 2 m de fibre unimodale de faible PMD et établir un signal de référence. Pour chaque longueur d'onde d'essai requise, répéter la procédure de mesure. Si la phase différentielle moyenne est négligeable, la contribution des conducteurs et des fibres amorces est également négligeable.

E.3 Calculs

E.3.1 Calcul du retard de groupe différentiel (DGD)

Les deux techniques de calcul aboutissent à une série de valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) en fonction de la longueur d'onde. La Figure E.4 fournit un exemple d'une telle fonction. En variante, les valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) peuvent être affichées sous la forme d'un histogramme tel que celui illustré sur la Figure E.5.

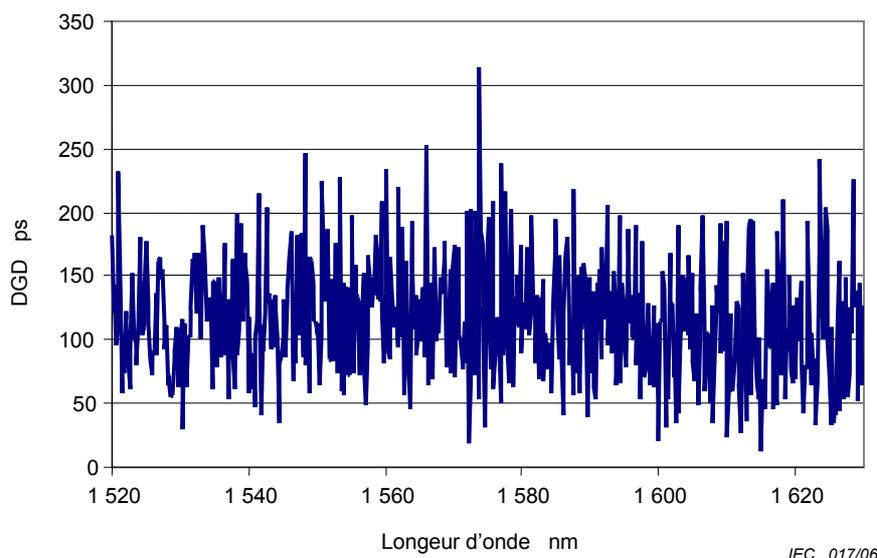


Figure E.4 – Retard de groupe différentiel (DGD) en fonction de la longueur d'onde

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

E.2.3 Calibration

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

E.3 Calculations

E.3.1 DGD calculations

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

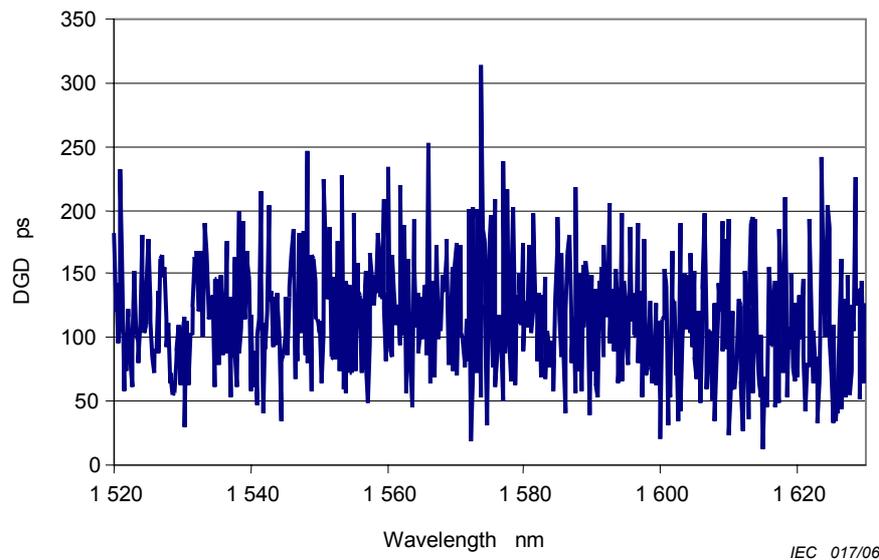


Figure E.4 – DGD versus wavelength

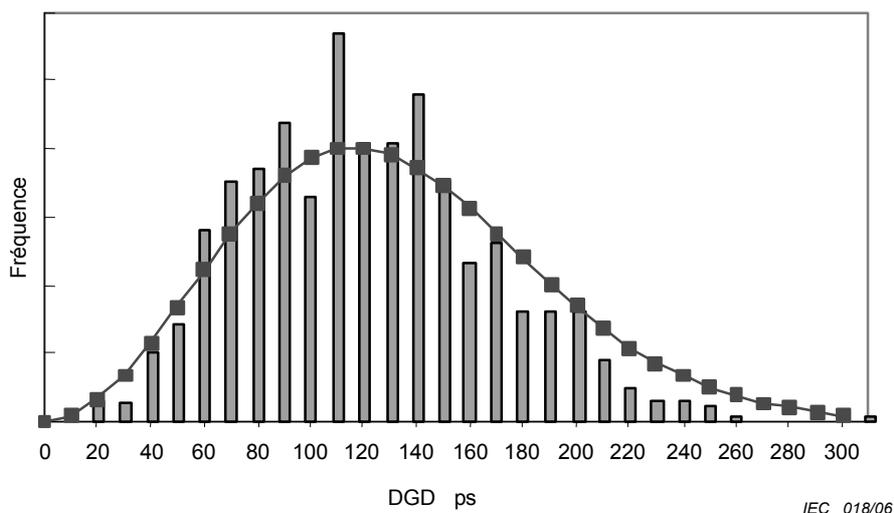


Figure E.5 – Histogramme du retard de groupe différentiel (DGD)

E.3.1.1 Calcul du retard de groupe différentiel (DGD) en utilisant la technique de balayage complet

Calculer la valeur du retard de groupe différentiel (DGD) (ps), pour chaque longueur d'onde λ (nm) à partir de la différence de phase maximale $\Delta\phi_{Max}(\lambda)$ (rad) (se reporter à E.2.2.1) et de la fréquence de modulation f (GHz) donnée par l'équation suivante:

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

E.3.1.2 Calcul du retard de groupe différentiel (DGD) en utilisant la technique de l'ensemble de Mueller

En utilisant la notation donnée en E.2.2.2, calculer la phase moyenne des deux états de polarisation principaux (PSP) $\phi_{RF}(\lambda)$, donnée par l'équation suivante:

$$\phi_{RF}(\lambda) = \frac{\Delta\phi_A(\lambda) + \Delta\phi_C(\lambda)}{2} \tag{E.6}$$

Ajuster les valeurs des phases mesurées par la phase moyenne de la manière suivante:

$$\begin{aligned} \phi_{RF,A}(\lambda) &= \Delta\phi_A(\lambda) - \phi_{RF}(\lambda) \\ \phi_{RF,B}(\lambda) &= \Delta\phi_B(\lambda) - \phi_{RF}(\lambda) \\ \phi_{RF,D}(\lambda) &= \Delta\phi_D(\lambda) - \phi_{RF}(\lambda) \end{aligned} \tag{E.7}$$

Calculer la différence de phase $\delta_{RF}(\lambda)$ donnée par l'équation suivante:

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

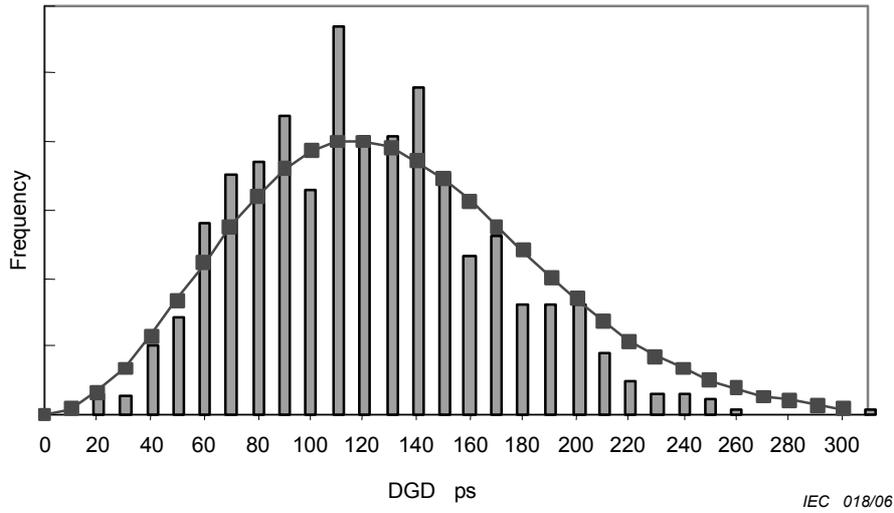


Figure E5 – DGD in histogram format

E.3.1.1 DGD calculation using full scan technique

Calculate the DGD value (ps), at each wavelength, λ (nm), from the maximum phase difference, $\Delta\phi_{\text{Max}}(\lambda)$ (rad) (see E.2.2.1), and modulation frequency, f , (GHz) as:

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

E.3.1.2 DGD calculation using Mueller set technique

Using the notation of E.2.2.2, calculate the average phase of the two PSPs, $\phi_{\text{RF}}(\lambda)$, as:

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

Adjust the measured phase values by the average phase as:

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

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

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

Le retard de groupe différentiel (DGD) (ps) est calculé en utilisant $\delta_{RF}(\lambda)$ (radians) et la fréquence de modulation f (GHz) donné par l'équation suivante:

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

E.3.2 Calcul de la dispersion de modulation de polarisation (PMD)

La valeur de la PMD (ps) pour une plage de longueurs d'onde est la moyenne des valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) pour la plage de longueurs d'onde donnée.

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

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

E.3.2 PMD calculation

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

Annexe F (normative)

Méthode de déphasage par polarisation

Cette annexe contient les exigences spécifiques à la méthode F, Méthode du déphasage par polarisation (voir [5], [6], [7], [8]).

F.1 Appareillage

La technique principale de la méthode de déphasage par polarisation (PPS) est donnée. La Figure F.1 illustre une représentation schématique de la méthode de déphasage par polarisation (PPS).

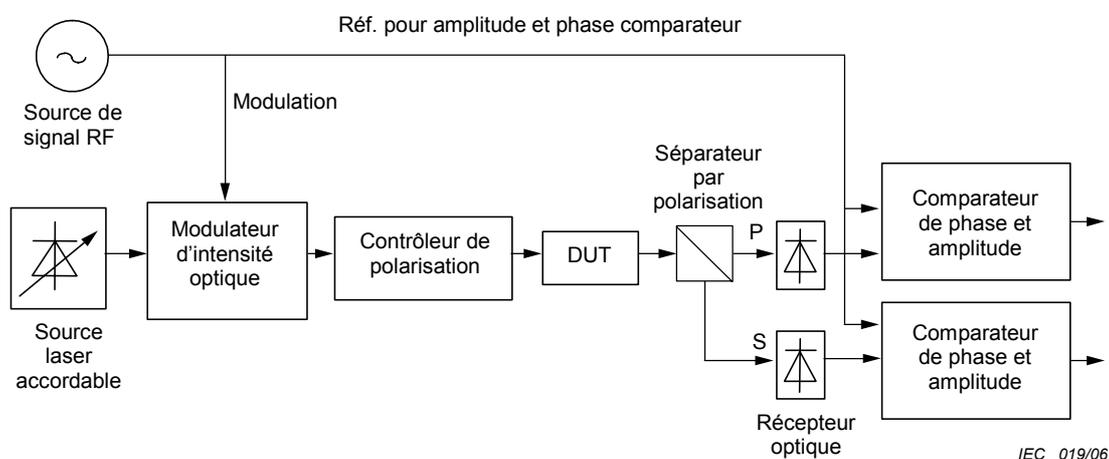


Figure F.1 – Représentation schématique pour la méthode F
(déphasage par polarisation)

F.1.1 Source lumineuse

Une source de laser accordable sert de source de lumière. La plage de réglage du laser doit être suffisante pour couvrir la plage de longueurs d'onde de la PMD. On peut utiliser des lasers à cavité externe contrôlés en température et en courant entièrement autonome.

F.1.2 Modulation

F.1.2.1 Source de signal RF

La source de signal en radiofréquence (RF) délivre un signal modulant pour le modulateur d'intensité optique. Une partie du signal modulant est envoyée au comparateur de phase et d'amplitude en tant que signal de référence. La source de signal RF doit présenter une caractéristique large bande parce qu'il est nécessaire de délivrer un signal modulant sinusoïdal dont la plage de fréquences est normalement de 50 MHz à 3 GHz. Pour sélectionner la fréquence de modulation, il convient de tenir compte de l'influence indésirable des bandes latérales de la modulation et de la résolution de la mesure du retard de groupe différentiel (DGD).

Les bandes latérales sont générées sur les deux côtés du signal optique avec une différence de fréquence f , qui est la fréquence de modulation. Cela représente l'étalement du spectre de la lumière. La résolution effective de la longueur d'onde $\Delta\lambda$ (nm) est limitée par la bande latérale et elle généralement donnée par:

Annex F (normative)

Polarization phase shift method

This annex contains requirements specific to Method F, the PPS method (see [5], [6], [7], [8]).

F.1 Apparatus

The primary technique of the PPS method is given. Figure F1 shows a block diagram of the PPS method.

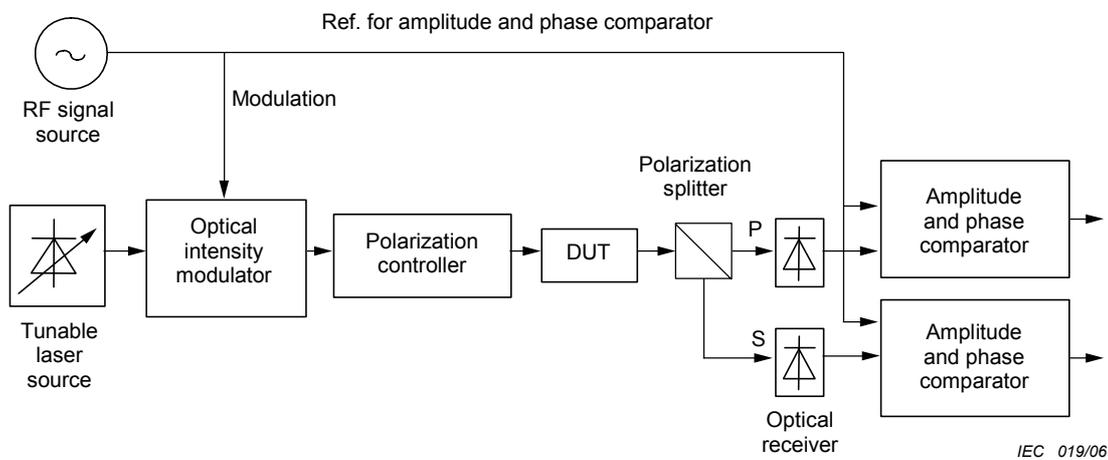


Figure F1 – Block diagram for Method F (polarization phase shift method)

F.1.1 Light source

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

F.1.2 Modulation

F.1.2.1 RF signal source

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

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

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

où

λ est la longueur d'onde (nm),

f est la fréquence de modulation (GHz),

c est la vitesse de la lumière dans le vide (m/s).

La résolution de la mesure du retard de groupe différentiel (DGD) ΔDGD (ps) est également limitée par la fréquence de modulation f et elle est généralement donnée par:

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

où

$\Delta\phi$ est la résolution de phase du comparateur de phase (degré)

f est la fréquence de modulation (GHz)

La précision de la phase totale, en incluant la stabilité de la fréquence de la source de signal RF doit être dans la plage $\pm 0,3^\circ$ pour garantir une précision de mesure adéquate.

F.1.2.2 Modulateur d'intensité optique

Le modulateur d'intensité optique reçoit des signaux modulant de la source de signal RF et module l'intensité de la lumière en sortie à partir de la source de laser accordable. On utilise généralement un modulateur de type LiNbO_3 .

F.1.3 Contrôle de la polarisation

Le contrôleur de polarisation est utilisé pour délivrer la lumière polarisée des états de polarisation (SOP) spécifiques au dispositif en essai. Le contrôleur de polarisation est constitué de trois composants: un polariseur, une lame quart d'onde et une lame demi-onde. On peut générer n'importe quel état de polarisation (SOP) par rotation des deux lames à retard. Le contrôleur de polarisation doit présenter d'excellentes caractéristiques pour offrir la précision de mesure attendue. La résolution de l'ajustement de l'angle doit être dans la plage $\pm 0,1^\circ$. Le rapport d'extinction de polarisation doit normalement être supérieur ou égal à 30 dB sur toute la plage de longueurs d'onde attendue.

NOTE Une restriction de la méthode est liée au fait que les lames quart d'onde et demi-onde ne présentent généralement pas un spectre plat.

F.1.4 Optique de sortie

La sortie du dispositif en essai est couplée au séparateur par polarisation avant les détecteurs optiques. Le séparateur par polarisation sépare la sortie du dispositif en essai en deux ondes polarisées, une lumière polarisée P et une lumière polarisée S. Le séparateur par polarisation est constitué d'un cristal non-isotrope, par exemple un prisme en calcite, et il possède généralement un rapport d'extinction de polarisation élevé et des pertes dépendant de la polarisation (PDL), un retard de groupe et un retard de groupe différentiel (DGD) très faibles. La plage de longueurs d'onde disponibles est normalement très large.

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

where

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

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

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

where

- $\Delta\phi$ is the phase resolution of the phase comparator (degree);
 f is the modulation frequency (GHz).

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

F.1.2.2 Optical intensity modulator

The optical intensity modulator receives modulating signals from the RF signal source, and modulates the intensity of output light from the tuneable laser source. A LiNbO_3 modulator is typically employed.

F.1.3 Polarization control

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

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

F.1.4 Output optics

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

F.1.5 Détecteurs optiques

Le détecteur optique convertit la lumière modulée provenant du dispositif en essai en signal électrique. On utilise généralement une photodiode PIN présentant une bonne linéarité. La photodiode PIN doit présenter une bande passante suffisante pour répondre à la fréquence de modulation de la source de signal RF. De plus, pour garantir un rapport signal/bruit élevé, il convient d'utiliser un amplificateur à large bande dans l'étage situé après le détecteur.

F.1.6 Comparateur d'amplitude et de phase

Le comparateur d'amplitude et de phase mesure l'amplitude et la phase en comparant les signaux pour chaque composante de l'onde polarisée avec le signal modulant de référence provenant de la source de signal RF. Le retard de groupe τ (ps) est calculé à partir de la phase en utilisant l'expression suivante:

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

où

ϕ est la phase (degré)

f est la fréquence de modulation (GHz)

F.1.7 Signal de référence

Le signal de référence, qui est une partie du signal modulant provenant de la source de signal RF, est délivré au comparateur de phase et d'amplitude. Le signal de référence doit être synchronisé sur le signal modulant.

F.2 Procédure

F.2.1 Fréquence de modulation

Le choix de la fréquence de modulation est basé sur la résolution de la longueur d'onde $\Delta\lambda$ requise pour les résultats des mesures et sur la résolution de la mesure du retard de groupe différentiel ΔDGD . Se reporter à F.1.2.1 pour plus d'informations.

F.2.2 Incrément de longueur d'onde

Deux longueurs d'onde sont nécessaires pour obtenir une valeur du retard de groupe différentiel (DGD) parce qu'on utilise la différentiation de longueurs d'onde dans cet incrément de longueur d'onde $\delta\lambda$ pour calculer un retard de groupe différentiel (DGD). On appelle cet incrément de longueur d'onde $\delta\lambda$ une taille d'échelon de longueur d'onde et la procédure de détermination de $\delta\lambda$ est expliquée. Une variation $\delta\lambda$, $\delta\lambda = (\lambda + \delta\lambda) - \lambda$, de la longueur d'onde de la source de laser accordable sert à changer l'angle de polarisation de l'état de polarisation (SOP) en sortie provenant du dispositif en essai, pour qu'il devienne inférieur à 45°. $\delta\lambda$ (nm) est généralement exprimée sous la forme:

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

où

λ est la longueur d'onde de la plage mesurée (nm)

c est la vitesse de la lumière dans le vide (m/s)

$\Delta\tau_{\max}$ est la valeur du retard de groupe différentiel (DGD) maximal prévu du dispositif en essai (ps)

F.1.5 Optical detectors

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

F.1.6 Amplitude and phase comparator

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

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

where

ϕ is the phase (degree);

f is the modulation frequency (GHz).

F.1.7 Reference signal

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

F.2 Procedure

F.2.1 Modulation frequency

The choice of modulation frequency is based on the wavelength resolution, $\Delta\lambda$, required for the measurement results and the DGD measurement resolution, ΔDGD . For more information, refer to F.1.2.1.

F.2.2 Wavelength increment

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

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

where

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

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

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

Par exemple, le produit du DGD maximal $\Delta\tau_{\max}$ et de la taille d'échelon de la longueur d'onde $\delta\lambda$ doit rester inférieur à 2 ps-nm pour une longueur d'onde de 1 550 nm.

F.2.3 Balayage des longueurs d'onde et mesure des retards de groupe différentiel (DGD)

La source laser accordable sert à effectuer une mesure longueur d'onde par longueur d'onde sur la plage de longueurs d'onde choisie et la valeur du retard de groupe différentiel (DGD) est calculée pour chaque longueur d'onde. En outre, la valeur de la PMD du dispositif en essai peut être calculée après le calcul d'une moyenne du retard de groupe différentiel (DGD) en se basant sur les valeurs de retard de groupe différentiel (DGD) obtenues précédemment sur la plage des longueurs d'onde mesurées.

Cette méthode utilise une paire d'onde polarisées orthogonales (les ondes polarisées linéairement à 0° et 90°). Les ondes polarisées linéairement à 0° et 90° sont injectées dans le dispositif en essai et la sortie est séparée en deux composantes d'ondes polarisées par le séparateur par polarisation. Ensuite, on mesure l'amplitude et le retard de groupe pour chaque onde polarisée (la lumière polarisée P et S) pour une longueur d'onde mesurée spécifique. C'est-à-dire qu'on mesure les amplitudes de la lumière polarisée P et S ($|T_{11}|^2_{\text{mea}}$ et $|T_{21}|^2_{\text{mea}}$ respectivement) et les retards de groupe ($d\Phi_{11}/d\omega_{\text{mea}}$ et $d\Phi_{21}/d\omega_{\text{mea}}$, respectivement) pour l'onde polarisée linéairement à 0°. Et pour l'onde polarisée linéairement à 90°, on mesure les amplitudes de la lumière polarisée P et S ($|T_{12}|^2_{\text{mea}}$ et $|T_{22}|^2_{\text{mea}}$) et les retards de groupe ($d\Phi_{12}/d\omega_{\text{mea}}$ et $d\Phi_{22}/d\omega_{\text{mea}}$).

F.2.4 Étalonnage

On effectue un étalonnage sur une fibre unimodale de faible PMD de longueur inférieure ou égale à 1 m avant de mesurer le dispositif en essai. D'abord, on ajuste les lames quart d'onde et demi-onde pour générer l'onde polarisée linéairement à 0° qui correspond à l'onde polarisée P du séparateur par polarisation. Ensuite, on génère l'onde polarisée linéairement à 90° qui correspond à l'onde polarisée S du séparateur par polarisation. Puis, pour une longueur d'onde de mesure spécifique, on mesure l'amplitude et le retard de groupe pour chacune des deux ondes polarisées (la lumière polarisée P et S) séparées par le séparateur par polarisation alors que les ondes polarisées linéairement 0° et 90° sont injectées alternativement. C'est-à-dire qu'on mesure les amplitudes de la lumière polarisée P et S ($|T_{11}|^2_{\text{cal}}$ et $|T_{21}|^2_{\text{cal}}$, respectivement) et les retards de groupe ($d\Phi_{11}/d\omega_{\text{cal}}$ et $d\Phi_{21}/d\omega_{\text{cal}}$, respectivement) pour l'onde polarisée linéairement à 0°. Et pour l'onde polarisée linéairement à 90°, on mesure les amplitudes de la lumière polarisée P et S ($|T_{12}|^2_{\text{cal}}$ et $|T_{22}|^2_{\text{cal}}$) et les retards de groupe ($d\Phi_{12}/d\omega_{\text{cal}}$ et $d\Phi_{22}/d\omega_{\text{cal}}$). La valeur du retard de groupe différentiel (DGD) est calculée à partir des valeurs mesurées en utilisant l'expression décrite en F.3.1.

F.3 Calculs

F.3.1 Théorie de la détermination du retard de groupe différentiel (DGD)

La technique de calcul peut aboutir à une série de valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) en fonction de la longueur d'onde. La Figure F.2 fournit un exemple de telles caractéristiques, similaire à une application de liaison.

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

F.2.3 Scanning wavelengths and measuring DGDs

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

This method uses a pair of orthogonal polarized waves (the 0 ° and 90 ° linearly polarized waves). The 0 ° and 90 ° linearly polarized waves are launched into the DUT and the output is separated into two polarized wave components by the polarization splitter. After that, the amplitude and group delay for each of the polarized waves (the P- and S- polarized light) at a specific measurement wavelength are measured. That is, the P- and S-polarized light amplitudes ($|T_{11}|^2_{\text{mea}}$ and $|T_{21}|^2_{\text{mea}}$, respectively) and the group delays ($d\Phi_{11}/d\omega_{\text{mea}}$ and $d\Phi_{21}/d\omega_{\text{mea}}$, respectively) for the 0 ° linearly polarized wave are measured. And for the 90 ° linearly polarized wave, the P- and S-polarized light amplitudes ($|T_{12}|^2_{\text{mea}}$ and $|T_{22}|^2_{\text{mea}}$) and the group delays ($d\Phi_{12}/d\omega_{\text{mea}}$ and $d\Phi_{22}/d\omega_{\text{mea}}$) are measured.

F.2.4 Calibration

A calibration is performed on a low PMD single-mode fibre whose length is 1 m or less before DUT measurement. First, adjust the quarter and half waveplates to generate the 0 ° linearly polarized wave that matches the P-polarized wave of the polarization splitter. Next, generate the 90 ° linearly polarized wave that matches the S-polarized wave of the polarization splitter. After that, at a specific measurement wavelength, measure the amplitude and group delay characteristics for each of two polarized waves (the P- and S-polarized light) that are separated by the polarization splitter while the 0 ° and 90 ° linearly polarized waves are alternately launched. That is, the P- and S-polarized light amplitudes ($|T_{11}|^2_{\text{cal}}$ and $|T_{21}|^2_{\text{cal}}$, respectively) and the group delays ($d\Phi_{11}/d\omega_{\text{cal}}$ and $d\Phi_{21}/d\omega_{\text{cal}}$, respectively) for the 0 ° linearly polarized wave are measured. And for the 90 ° linearly polarized wave, the P- and S-polarized light amplitudes ($|T_{12}|^2_{\text{cal}}$ and $|T_{22}|^2_{\text{cal}}$) and group delays ($d\Phi_{12}/d\omega_{\text{cal}}$ and $d\Phi_{22}/d\omega_{\text{cal}}$) are measured. The DGD value is calculated from the measured values using the expression described in F.3.1.

F.3 Calculations

F.3.1 DGD determination theory

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

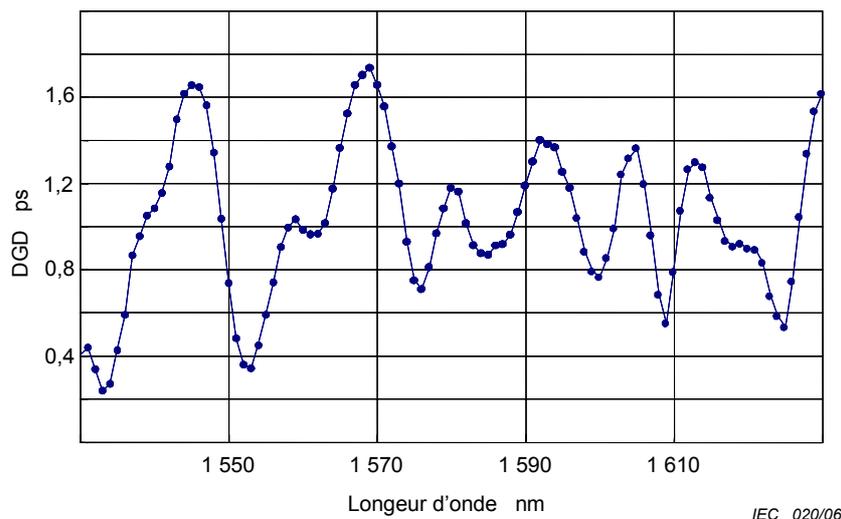


Figure F.2 – Retard de groupe différentiel (DGD) en fonction de la longueur d'onde pour un dispositif à couplage de mode aléatoire

Les paramètres suivants sont calculés en utilisant les valeurs mesurées en F.2.3 et F.2.4.

$$\begin{aligned}
 \bar{\alpha}_1 &= \frac{\Delta\theta}{\Delta\omega} = \frac{\Delta\theta}{2\pi c \cdot \delta\lambda} \cdot \lambda_i \lambda_f \\
 \bar{\beta}_1 &= \frac{1}{4} \left(\frac{d\Phi_{11}}{d\omega} - \frac{d\Phi_{22}}{d\omega} - \frac{d\Phi_{21}}{d\omega} + \frac{d\Phi_{12}}{d\omega} \right) \\
 \bar{\gamma}_1 &= \frac{1}{4} \left(\frac{d\Phi_{11}}{d\omega} - \frac{d\Phi_{22}}{d\omega} + \frac{d\Phi_{21}}{d\omega} - \frac{d\Phi_{12}}{d\omega} \right) \\
 \theta &= \frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\frac{|T_{11}|^2 - |T_{21}|^2}{|T_{11}|^2 + |T_{21}|^2} \right) \\
 \cos 2\theta_0 &= \frac{|T_{11}|^2 - |T_{21}|^2}{|T_{11}|^2 + |T_{21}|^2}
 \end{aligned} \tag{F.5}$$

où

λ_i, λ_f sont la longueur d'onde initiale et la longueur d'onde finale de $\delta\lambda$

$$|T_{kl}|^2 = \frac{|T_{kl}|_{\text{mea}}^2}{|T_{11}|_{\text{cal}}^2} \quad \frac{d\Phi_{kl}}{d\omega} = \frac{d\Phi_{kl}}{d\omega}_{\text{mea}} - \frac{d\Phi_{11}}{d\omega}_{\text{cal}} \quad kl = 11 \text{ et } 12$$

$$|T_{mn}|^2 = \frac{|T_{mn}|_{\text{mea}}^2}{|T_{22}|_{\text{cal}}^2} \quad \frac{d\Phi_{mn}}{d\omega} = \frac{d\Phi_{mn}}{d\omega}_{\text{mea}} - \frac{d\Phi_{22}}{d\omega}_{\text{cal}} \quad mn = 21 \text{ et } 22$$

La valeur du retard de groupe différentiel (DGD) pour chaque longueur d'onde est calculée en utilisant $\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1, \bar{\gamma}_1$ et θ_0 comme suit:

$$DGD(\lambda) = 2\sqrt{\bar{\alpha}_1^2 + \bar{\beta}_1^2 + \bar{\gamma}_1^2 + 2\bar{\beta}_1\bar{\gamma}_1\cos 2\theta_0} \tag{F.6}$$

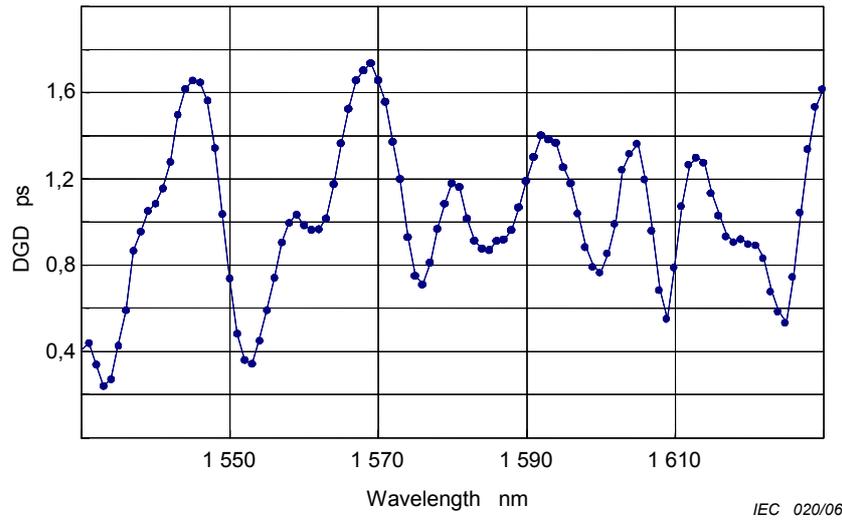


Figure F.2 – DGD versus wavelength for a random mode coupling device

The following parameters are calculated using measured values in F.2.3 and F.2.4.

$$\begin{aligned}
 \bar{\alpha}_1 &= \frac{\Delta\theta}{\Delta\omega} = \frac{\Delta\theta}{2\pi c \cdot \delta\lambda} \cdot \lambda_i \lambda_f \\
 \bar{\beta}_1 &= \frac{1}{4} \left(\frac{d\Phi_{11}}{d\omega} - \frac{d\Phi_{22}}{d\omega} - \frac{d\Phi_{21}}{d\omega} + \frac{d\Phi_{12}}{d\omega} \right) \\
 \bar{\gamma}_1 &= \frac{1}{4} \left(\frac{d\Phi_{11}}{d\omega} - \frac{d\Phi_{22}}{d\omega} + \frac{d\Phi_{21}}{d\omega} - \frac{d\Phi_{12}}{d\omega} \right) \\
 \theta &= \frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\frac{|T_{11}|^2 - |T_{21}|^2}{|T_{11}|^2 + |T_{21}|^2} \right) \\
 \cos 2\theta_0 &= \frac{|T_{11}|^2 - |T_{21}|^2}{|T_{11}|^2 + |T_{21}|^2}
 \end{aligned} \tag{F.5}$$

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

$$|T_{kl}|^2 = \frac{|T_{kl}|_{\text{mea}}^2}{|T_{11}|_{\text{cal}}^2} \quad \frac{d\Phi_{kl}}{d\omega} = \frac{d\Phi_{kl}}{d\omega}_{\text{mea}} - \frac{d\Phi_{11}}{d\omega}_{\text{cal}} \quad \text{kl}=11 \text{ and } 12$$

$$|T_{mn}|^2 = \frac{|T_{mn}|_{\text{mea}}^2}{|T_{22}|_{\text{cal}}^2} \quad \frac{d\Phi_{mn}}{d\omega} = \frac{d\Phi_{mn}}{d\omega}_{\text{mea}} - \frac{d\Phi_{22}}{d\omega}_{\text{cal}} \quad \text{mn}=21 \text{ and } 22$$

The DGD value for each wavelength is calculated using $\bar{\alpha}_1$, $\bar{\beta}_1$, $\bar{\gamma}_1$ and θ_0 as:

$$DGD(\lambda) = 2\sqrt{\bar{\alpha}_1^2 + \bar{\beta}_1^2 + \bar{\gamma}_1^2 + 2\bar{\beta}_1\bar{\gamma}_1 \cos 2\theta_0} \tag{F.6}$$

F.3.2 Détermination du retard de groupe différentiel (DGD)

La définition du retard de groupe différentiel (DGD) pour cette méthode est décrite. La matrice de la fonction de transfert optique peut être exprimée sous la forme:

$$T(\omega) = \begin{bmatrix} |T_{11}| \cdot \exp(-j\Phi_{11}) & |T_{12}| \cdot \exp(-j\Phi_{12}) \\ |T_{21}| \cdot \exp(-j\Phi_{21}) & |T_{22}| \cdot \exp(-j\Phi_{22}) \end{bmatrix} \quad (F.7)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\Theta \cdot \exp(-j\phi - j\psi) & -\sin\Theta \cdot \exp(-j\phi + j\psi) \\ \sin\Theta \cdot \exp(+j\phi - j\psi) & \cos\Theta \cdot \exp(+j\phi + j\psi) \end{bmatrix} \cdot \exp(-j\Phi)$$

où

Θ est l'angle de polarisation

ϕ est la différence de phase entre T_{11} et T_{21}

ψ est la différence de phase entre T_{11} et T_{12}

Φ est le déphasage indépendant de la polarisation

Le vecteur de polarisation de sortie $E^{\text{out}}(\omega)$ est exprimé en utilisant $T(\omega)$ sous la forme:

$$E^{\text{out}}(\omega) = T(\omega) \cdot E^{\text{in}}(\omega) \quad (F.8)$$

où

$E^{\text{in}}(\omega)$ est la transformée de Fourier d'un signal d'entrée optique,

$E^{\text{out}}(\omega)$, décrit par développement en série de Taylor autour de la fréquence porteuse optique ω_0 est exprimé sous la forme:

$$E^{\text{out}}(\omega) = E^{\text{out}}(\omega_0) + \left. \frac{dE^{\text{out}}}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} \delta\omega + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2 E^{\text{out}}}{d\omega^2} \right|_{\omega=\omega_0} \delta\omega^2 \quad (F.9)$$

où $\delta\omega = \omega - \omega_0$.

L'opérateur $D(\omega)$ de la PMD du premier ordre, qu'il convient d'appeler un opérateur différentiel de la fonction de transfert, est exprimé sous la forme:

$$D(\omega) = \frac{dT(\omega)}{d\omega} \cdot T(\omega)^{-1} \quad (F.10)$$

Ainsi, on obtient l'expression suivante en remplaçant (F.10) par (F.9).

$$E^{\text{out}}(\omega) = \left\{ 1 + D\delta\omega + \frac{1}{2} D^2 \delta\omega^2 + \frac{1}{2} \frac{dD}{d\omega} \delta\omega^2 \right\} \cdot E^{\text{out}}(\omega_0) \quad (F.11)$$

$$\cong \exp \left\{ D\delta\omega + \frac{1}{2} \frac{dD}{d\omega} \delta\omega^2 \right\} \cdot E^{\text{out}}(\omega_0)$$

où le terme d'ordre le plus élevé est négligeable. $D(\omega)$ est l'opérateur de la PMD du premier ordre et $dD(\omega)/d\omega$ est l'opérateur de la PMD du deuxième ordre. Ils ne sont pas commutatifs.

F.3.2 DGD determination

The definition of DGD concerning this method is described. The optical transfer function matrix can be expressed as:

$$T(\omega) = \begin{bmatrix} |T_{11}| \cdot \exp(-j\Phi_{11}) & |T_{12}| \cdot \exp(-j\Phi_{12}) \\ |T_{21}| \cdot \exp(-j\Phi_{21}) & |T_{22}| \cdot \exp(-j\Phi_{22}) \end{bmatrix} \quad (F7)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta \cdot \exp(-j\phi - j\psi) & -\sin\theta \cdot \exp(-j\phi + j\psi) \\ \sin\theta \cdot \exp(+j\phi - j\psi) & \cos\theta \cdot \exp(+j\phi + j\psi) \end{bmatrix} \cdot \exp(-j\Phi)$$

where

θ is the polarization angle

ϕ is the phase difference between T_{11} and T_{21}

ψ is the phase difference between T_{11} and T_{12}

Φ is the polarization-independent phase shift

The output polarization vector, $E^{\text{out}}(\omega)$, is expressed using $T(\omega)$ as:

$$E^{\text{out}}(\omega) = T(\omega) \cdot E^{\text{in}}(\omega) \quad (F8)$$

where $E^{\text{in}}(\omega)$ is the Fourier transform of an optical input signal.

$E^{\text{out}}(\omega)$, which is described by Taylor expansion around the optical carrier frequency ω_0 is expressed as:

$$E^{\text{out}}(\omega) = E^{\text{out}}(\omega_0) + \left. \frac{dE^{\text{out}}}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} \delta\omega + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2 E^{\text{out}}}{d\omega^2} \right|_{\omega=\omega_0} \delta\omega^2 \quad (F9)$$

where $\delta\omega = \omega - \omega_0$.

The first order PMD operator $D(\omega)$ that should be called a transfer function differential operator is expressed as:

$$D(\omega) = \frac{dT(\omega)}{d\omega} \cdot T(\omega)^{-1} \quad (F10)$$

Therefore, the following expression is obtained by substituting (F10) for (F9).

$$E^{\text{out}}(\omega) = \left\{ 1 + D\delta\omega + \frac{1}{2} D^2 \delta\omega^2 + \frac{1}{2} \frac{dD}{d\omega} \delta\omega^2 \right\} \cdot E^{\text{out}}(\omega_0) \quad (F11)$$

$$\cong \exp \left\{ D\delta\omega + \frac{1}{2} \frac{dD}{d\omega} \delta\omega^2 \right\} \cdot E^{\text{out}}(\omega_0)$$

Where the high order term is negligible. $D(\omega)$ is the first order PMD operator and $dD(\omega)/d\omega$ is the second order PMD operator. They are not commutative with each other.

On obtient l'expression suivante en diagonalisant $D(\omega)$ avec l'opérateur unitaire X .

$$\begin{aligned} X^{-1} \cdot E^{\text{out}}(\omega) &= X^{-1} \exp(D \cdot \delta\omega) X \cdot X^{-1} E^{\text{out}}(\omega_0) \\ &= \begin{bmatrix} \exp(-j\Gamma_+ \cdot \delta\omega) & 0 \\ 0 & \exp(-j\Gamma_- \cdot \delta\omega) \end{bmatrix} \cdot X^{-1} E^{\text{out}}(\omega_0) \end{aligned} \quad (\text{F.12})$$

où $-j\Gamma_{+/-}$ sont les valeurs propres de $D(\omega)$ et Γ_+ , Γ_- sont, respectivement, le retard de groupe maximal et le retard de groupe minimal.

C'est-à-dire, la différence entre les parties imaginaires des valeurs propres de $D(\omega)$, $\Gamma_+ - \Gamma_-$, est le retard de groupe différentiel (DGD).

Les quatre paramètres indépendants Θ , ϕ , ψ et Φ décrits dans l'expression (F.7) donnent l'expression suivante en utilisant le développement en série de Taylor.

$$\begin{aligned} \Theta &= \Theta_0 + \bar{\alpha}_1 \delta\omega + \frac{1}{2} \bar{\alpha}_2 \delta\omega^2 \\ \phi &= \phi_0 + \bar{\beta}_1 \delta\omega + \frac{1}{2} \bar{\beta}_2 \delta\omega^2 \\ \psi &= \psi_0 + \bar{\gamma}_1 \delta\omega + \frac{1}{2} \bar{\gamma}_2 \delta\omega^2 \\ \Phi &= \Phi_0 + \beta_1 \delta\omega + \frac{1}{2} \beta_2 \delta\omega^2 \end{aligned} \quad (\text{F.13})$$

où

$$\delta\omega = \omega - \omega_c$$

$\Theta_0, \phi_0, \psi_0, \Phi_0$ sont les valeurs de Θ, ϕ, ψ, Φ à $\omega - \omega_c$

$\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1, \bar{\gamma}_1, \beta_1$ sont les coefficients du premier ordre du développement en série de Taylor de Θ, ϕ, ψ, Φ

$\bar{\alpha}_2, \bar{\beta}_2, \bar{\gamma}_2, \beta_2$ sont les coefficients du deuxième ordre du développement en série de Taylor de Θ, ϕ, ψ, Φ

L'opérateur $D(\omega)$ de la PMD du premier ordre est exprimé en utilisant l'équation (F.13) sous la forme:

$$D(\omega) = -j\beta_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - j \begin{bmatrix} \bar{\beta}_1 + \bar{\gamma}_1 \cos 2\theta & (-j\bar{\alpha}_1 + \bar{\gamma}_1 \sin 2\theta) \cdot e^{-j2\phi} \\ (+j\bar{\alpha}_1 + \bar{\gamma}_1 \sin 2\theta) \cdot e^{+j2\phi} & -\bar{\beta}_1 - \bar{\gamma}_1 \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (\text{F.14})$$

Ainsi, les valeurs propres de $D(\omega)$ sont exprimées sous la forme:

$$j\Gamma_{\pm} = -j\beta_1 \pm j\sqrt{\bar{\alpha}_1^2 + \bar{\beta}_1^2 + \bar{\gamma}_1^2 + 2\bar{\beta}_1\bar{\gamma}_1\cos 2\theta} \quad (\text{F.15})$$

où β_1 est le retard de groupe indépendant de la polarisation.

Le retard de groupe différentiel (DGD) $\Delta\tau$ est donné par la différence entre les parties imaginaires des deux valeurs propres sous la forme:

$$\Delta\tau = \Gamma_+ - \Gamma_- = 2\sqrt{\bar{\alpha}_1^2 + \bar{\beta}_1^2 + \bar{\gamma}_1^2 + 2\bar{\beta}_1\bar{\gamma}_1\cos 2\theta} \quad (\text{F.16})$$

The following expression is obtained by diagonalizing $D(\omega)$ with the unitary operator X .

$$\begin{aligned} X^{-1} \cdot E^{\text{out}}(\omega) &= X^{-1} \exp(D \cdot \delta\omega) X \cdot X^{-1} E^{\text{out}}(\omega_0) \\ &= \begin{bmatrix} \exp(-j\Gamma_+ \cdot \delta\omega) & 0 \\ 0 & \exp(-j\Gamma_- \cdot \delta\omega) \end{bmatrix} \cdot X^{-1} E^{\text{out}}(\omega_0) \end{aligned} \quad (\text{F12})$$

Where $-j\Gamma_{+/-}$ are the eigenvalues of $D(\omega)$ and Γ_+ , Γ_- are respectively the maximum, minimum group delay.

That is, the difference between the imaginary parts of the eigenvalues of $D(\omega)$, $\Gamma_+ - \Gamma_-$, is the DGD.

Four independent parameters Θ , ϕ , ψ and Φ described in expression (F7) make the following expression using Taylor expansion.

$$\begin{aligned} \Theta &= \Theta_0 + \bar{\alpha}_1 \delta\omega + \frac{1}{2} \bar{\alpha}_2 \delta\omega^2 \\ \phi &= \phi_0 + \bar{\beta}_1 \delta\omega + \frac{1}{2} \bar{\beta}_2 \delta\omega^2 \\ \psi &= \psi_0 + \bar{\gamma}_1 \delta\omega + \frac{1}{2} \bar{\gamma}_2 \delta\omega^2 \\ \Phi &= \Phi_0 + \beta_1 \delta\omega + \frac{1}{2} \beta_2 \delta\omega^2 \end{aligned} \quad (\text{F13})$$

where

$$\delta\omega = \omega - \omega_c$$

Θ_0 , ϕ_0 , ψ_0 , Φ_0 are the values of Θ , ϕ , ψ , Φ at $\omega - \omega_c$

$\bar{\alpha}_1$, $\bar{\beta}_1$, $\bar{\gamma}_1$, β_1 are the first order coefficients of Taylor expansion of Θ , ϕ , ψ , Φ

$\bar{\alpha}_2$, $\bar{\beta}_2$, $\bar{\gamma}_2$, β_2 are the second order coefficients of Taylor expansion of Θ , ϕ , ψ , Φ

The first order PMD operator $D(\omega)$ is expressed using Equation (F13) as:

$$D(\omega) = -j\beta_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - j \begin{bmatrix} \bar{\beta}_1 + \bar{\gamma}_1 \cos 2\Theta & (-j\bar{\alpha}_1 + \bar{\gamma}_1 \sin 2\Theta) \cdot e^{-j2\phi} \\ (+j\bar{\alpha}_1 + \bar{\gamma}_1 \sin 2\Theta) \cdot e^{+j2\phi} & -\bar{\beta}_1 - \bar{\gamma}_1 \cos 2\Theta \end{bmatrix} \quad (\text{F14})$$

Therefore, the eigenvalues of $D(\omega)$ are expressed as:

$$j\Gamma_{\pm} = -j\beta_1 \pm j\sqrt{\bar{\alpha}_1^2 + \bar{\beta}_1^2 + \bar{\gamma}_1^2 + 2\bar{\beta}_1\bar{\gamma}_1\cos 2\Theta} \quad (\text{F15})$$

where β_1 is the polarization-independent group delay.

The DGD, $\Delta\tau$, is given by the difference between the imaginary parts of the two eigenvalues as:

$$\Delta\tau = \Gamma_+ - \Gamma_- = 2\sqrt{\bar{\alpha}_1^2 + \bar{\beta}_1^2 + \bar{\gamma}_1^2 + 2\bar{\beta}_1\bar{\gamma}_1\cos 2\Theta} \quad (\text{F16})$$

F.3.3 Calcul de la dispersion de modulation de polarisation (PMD)

La valeur de la PMD dans la plage de longueurs d'onde mesurées est donnée par la valeur moyenne du retard de groupe différentiel (DGD) sur la plage de longueurs d'onde mesurées (PMD_{moyen}).

F.3.3 PMD calculation

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

Annexe G
(informative)

**Détermination de la dispersion de mode de polarisation (PMD)
par la Méthode C**

La présente annexe fournit des algorithmes pour déterminer la largeur de la moyenne quadratique des données interférométriques mesurées en utilisant la Méthode C. L'Annexe C donne des exemples de tels interférogrammes. Ces algorithmes ont pour objectif principal de supprimer les phénomènes de bruit.

G.1 Analyse traditionnelle

L'algorithme suivant ne s'applique qu'à la méthode C (TINTY) dans le contexte des hypothèses décrites à l'Annexe C.

Soit \tilde{I}_j l'intensité mesurée de l'interférogramme à des positions croissantes t_j (ps), $j = 1 \dots N$.

Étape 1: Calcul de l'intensité zéro \tilde{I}_0 et de l'amplitude de bruit Na

Définition: $N_s = \text{environ } (5 N / 100)$ est la valeur entière pour laquelle \tilde{I}_j est approximativement égal à 5 %.

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

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

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

Étape 2: Définition de l'intensité décalée I_j

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

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

Annex G (informative)

PMD determination by Method C

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

G.1 Traditional analysis

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

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

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

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

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

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

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

Step 2: Definition of the shifted intensity I_j

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

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

Étape 3: Calcul du centre C de l'interférogramme

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

Étape 4: Suppression du pic d'autocorrélation

Définition:

$$j_l = \text{indice maximal } j \text{ tel que } C - t_j > t_c \quad (G.7)$$

$$j_r = \text{indice minimal } j \text{ tel que } t_j - v > t_c \quad (G.8)$$

où t_c est le temps de cohérence de source.

NOTE Pour les interférogrammes de corrélation croisée, la définition suivante s'applique:

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

Étape 5: Calcul du moment d'ordre 2 S de l'interférogramme

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

Étape 6: Tronquer l'interférogramme

$$\text{Régler } j_{\min} \text{ à l'indice maximal } j \text{ tel que } C - t_j > 2S \quad (G.11)$$

$$\text{Régler } j_{\max} \text{ à l'indice minimal } j \text{ tel que } t_j - C > 2S \quad (G.12)$$

Étape 7: Calcul du moment d'ordre 2 σ_ε de l'interférogramme

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

Étape 8: Calcul de σ_ε de la gaussienne $\exp\left[-\frac{(t-C)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right]$ tel que

Step 3: Computation of the centre C of the interferogram

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

Step 4: Removal of the autocorrelation peak

Definition:

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

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

where

t_c is the source coherence time.

NOTE For cross-correlation interferograms the following definition applies:

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

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

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

Step 6: Truncate the interferogram

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

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

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

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

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

$$\sigma_s = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{\int_{t_{j\min}}^{t_{j\max}} (t-C)^2 \exp\left[-\frac{(t-C)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right] dt}{\int_{t_{j\min}}^{t_{j\max}} \exp\left[-\frac{(t-C)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right] dt}} + \sqrt{\frac{\int_{t_{j\min}}^{t_{j\max}} (t-C)^2 \exp\left[-\frac{(t-C)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right] dt}{\int_{t_{j\min}}^{t_{j\max}} \exp\left[-\frac{(t-C)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right] dt}} \right\} \quad (G.14)$$

σ_ε est calculé par itération à partir de (G14).

G.2 Analyse générale

L'algorithme suivant donne une largeur de moyenne quadratique fiable pour les carrés de l'enveloppe de l'autocorrélation et de l'enveloppe de la corrélation croisée composées en utilisant la méthode C (GINTY).

L'algorithme est itératif. Pour une itération donnée, la matrice des données est divisée en deux parties: la partie centrale M , qui contient le signal et les queues T , qui contiennent le bruit. Chaque itération donne différentes définitions pour ces parties. Le résultat est convergent lorsque, soit la largeur de la moyenne quadratique calculée cesse de varier, soit lorsque les définitions des parties se stabilisent. Pour une itération, le nombre de points de données dans chaque partie est noté N_M et N_T .

Soit \tilde{I}_j l'intensité mesurée de l'enveloppe à des positions croissantes t_j (ps), $j = 1 \dots N$.

Initialement la partie T est définie comme les premiers et les derniers 5 % de la matrice complète.

Étape 1: Calcul de l'intensité zéro \tilde{I}_0

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

Étape 2: Définition de l'intensité décalée I_j

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

Étape 3: Calcul du centre C de l'interférogramme

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

Étape 4: Calcul de la largeur de la moyenne quadratique σ des carrés de l'enveloppe

$$\sigma_s = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{\int_{t_{j\min}}^{t_{j\max}} (t-C)^2 \exp\left[-\frac{(t-C)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right] dt}{\int_{t_{j\min}}^{t_{j\max}} \exp\left[-\frac{(t-C)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right] dt}} + \sqrt{\frac{\int_{t_{j\min}}^{t_{j\max}} (t-C)^2 \exp\left[-\frac{(t-C)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right] dt}{\int_{t_{j\min}}^{t_{j\max}} \exp\left[-\frac{(t-C)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}\right] dt}} \right\} \quad (\text{G.14})$$

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

G.2 General analysis

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

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

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

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

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

$$\tilde{I}_0 = \sum_{j \in T} \tilde{I}_j / N_T \quad (\text{G15})$$

Step 2: Definition of the shifted intensity I_j

$$I_j = \tilde{I}_j - \tilde{I}_0 \quad \text{all } N \quad (\text{G16})$$

Step 3: Computation of the centre C of the interferogram

$$C = \frac{\sum_{j \in M} t_j I_j}{\sum_{j \in M} I_j} \quad (\text{G17})$$

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

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

Étape 5: Redéfinir les parties

Définir M comme l'ensemble de points pour lesquels $C - 4\sigma \leq t_j \leq C + 4\sigma$.

Définir T comme le reste des points.

Étape 6: Répéter les étapes 1 à 5 jusqu'à ce que les résultats convergent

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{j \in M} (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j \in M} I_j} \quad (\text{G18})$$

Step 5: Redefine 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: Repeat steps 1 to 5 until the results converge

Bibliographie

- [1] WILLIAMS, PA. *Modulation phase-shift measurement of PMD using only four launched polarization states: a new algorithm*. Electronics Letters Online No. 19991068, July, 1999.
- [2] JONES, RC. A new calculus for the treatment of optical systems. VI. Experimental determination of the matrix. *J. Optical Soc. Am.*, 1947, 37, pp. 110-112.
- [3] GISIN, N., GISIN, B., VON DER WEID, J.P. and PASSY, R. How accurately can one measure a statistical quantity like polarization-mode dispersion. *Photonics Technology Letters*, Dec 1996, Vol. 8, No. 12.
- [4] CYR, N., SCHINN, G.W. and GIRARD, A. *Stokes parameter analysis method, the consolidated test method for PMD measurements*. The National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC), '99 Session A6, Polarization effects in systems, Sept. 26-30, 1999.
- [5] SANO, K., KUDOU, T. and OZEKI, T. *Simultaneous Measurement of Group Delay Time Dispersion and Polarization Mode Dispersion*. ECOC '96 , TuP-09, pp.253-256.
- [6] SANO, K., KUDOU, T. and OZEKI, T. *A New Measurement Method of Polarization Mode Dispersion*. OECC '96, Oslo.
- [7] OZEKI, T. *Mathematical Analysis on Definition, and Statistics of Polarization Mode Dispersion*. SB-8-1, IEICE Spring Conference in Hiroshima 2000.
- [8] YAMASHITA, T. and IMAMURA, M. *Simultaneous and High Resolution Measurement of Polarization Mode Dispersion, Group Delay, Chromatic Dispersion and Amplitude for Ultra-High Speed Optical Components*. NFOEC'01, vol.3, pp.1348-1352, 2001.
- [9] GISIN, N., VON DER WEID, J.P. and PELLAUX, J.P. Polarization mode-dispersion of short and long single-mode fibers. *J. Lightwave Technol.*, 1991, Vol. 9, 821-827.
- [10] GISIN, N., PASSY, R. and VON DER WEID, J.P. Definitions and measurements of polarization mode dispersion: Interferometric versus fixed analyser methods. *J. Lightwave Technol.*, Vol. 6, 730-732, 1994.
- [11] GISIN, N. Solutions of the dynamical equation for polarization dispersion. *Opt. Commun.*, 1991, Vol. 86, 371-373.
- [12] CYR, N. Polarization-mode dispersion measurement: generalization of the interferometric method to any coupling regime. *J. Lightwave Technol.*, March 2004, Vol. 22, No. 3, 794- 805.

CEI 60793-1-48: *Fibres optiques – Partie 1-48: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Dispersion de mode de polarisation*

CEI 61282-3: *Guides de conception des systèmes de communication à fibres optiques – Partie 3: Calcul de la dispersion de mode de polarisation*

CEI 61290-11-1: *Méthodes d'essai des amplificateurs à fibres optiques – Partie 11-1: Dispersion en mode de polarisation – Méthode d'analyse propre de matrice de Jones (JME)*

Bibliography

- [1] WILLIAMS, PA. *Modulation phase-shift measurement of PMD using only four launched polarization states: a new algorithm*. Electronics Letters Online No. 19991068, July, 1999.
- [2] JONES, RC. A new calculus for the treatment of optical systems. VI. Experimental determination of the matrix. *J. Optical Soc. Am.*, 1947, 37, pp. 110-112.
- [3] GISIN, N., GISIN, B., VON DER WEID, J.P. and PASSY, R. How accurately can one measure a statistical quantity like polarization-mode dispersion. *Photonics Technology Letters*, Dec 1996, Vol. 8, No. 12.
- [4] CYR, N., SCHINN, G.W. and GIRARD, A. *Stokes parameter analysis method, the consolidated test method for PMD measurements*. The National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC), '99 Session A6, Polarization effects in systems, Sept. 26-30, 1999.
- [5] SANO, K., KUDOU, T. and OZEKI, T. *Simultaneous Measurement of Group Delay Time Dispersion and Polarization Mode Dispersion*. ECOC '96 , TuP-09, pp.253-256.
- [6] SANO, K., KUDOU, T. and OZEKI, T. *A New Measurement Method of Polarization Mode Dispersion*. OECC '96, Oslo.
- [7] OZEKI, T. *Mathematical Analysis on Definition, and Statistics of Polarization Mode Dispersion*. SB-8-1, IEICE Spring Conference in Hiroshima 2000.
- [8] YAMASHITA, T. and IMAMURA, M. *Simultaneous and High Resolution Measurement of Polarization Mode Dispersion, Group Delay, Chromatic Dispersion and Amplitude for Ultra-High Speed Optical Components*. NFOEC'01, vol.3, pp.1348-1352, 2001.
- [9] GISIN, N., VON DER WEID, J.P. and PELLAUX, J.P. Polarization mode-dispersion of short and long single-mode fibers. *J. Lightwave Technol.*, 1991, Vol. 9, 821-827.
- [10] GISIN, N., PASSY, R. and VON DER WEID, J.P. Definitions and measurements of polarization mode dispersion: Interferometric versus fixed analyser methods. *J. Lightwave Technol.*, Vol. 6, 730-732, 1994.
- [11] GISIN, N. Solutions of the dynamical equation for polarization dispersion. *Opt. Commun.*, 1991, Vol. 86, 371-373.
- [12] CYR, N. Polarization-mode dispersion measurement: generalization of the interferometric method to any coupling regime. *J. Lightwave Technol.*, March 2004, Vol. 22, No. 3, 794- 805.

IEC 60793-1-48: *Optical fibres – Part 1-48: Measurement methods and test procedures – Polarization mode dispersion*

IEC 61282-3: *Fibre optic communication system design guides – Part 3: Calculation of polarization mode dispersion*

IEC 61290-11-1: *Optical amplifier test methods – Part 11-1: Polarization mode dispersion – Jones matrix eigenanalysis method (JME)*

CEI 61290-11-2: *Amplificateurs optiques – Méthodes d’essai – Partie 11-2: Paramètre de dispersion en mode de polarisation – Méthode d’analyse par la sphère de Poincaré*

CEI 61300-3-32: *Dispositifs d’interconnexion et composants passifs à fibres optiques – Procédures fondamentales d’essais et de mesures – Partie 3-32: Examens et mesures – Mesure de la dispersion de mode de polarisation des composants optiques passifs*⁶



⁶ A publier.

IEC 61290-11-2: *Optical amplifiers – Test methods – Part 11-2: Polarization mode dispersion parameter – Poincaré sphere analysis method (PSA)*

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 for passive optical components* ⁷⁾

⁷⁾ To be published.

LICENSED TO MECON Limited. - RANCHI/BANGALORE
FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY, SUPPLIED BY BOOK SUPPLY BUREAU.



Standards Survey

The IEC would like to offer you the best quality standards possible. To make sure that we continue to meet your needs, your feedback is essential. Would you please take a minute to answer the questions overleaf and fax them to us at +41 22 919 03 00 or mail them to the address below. Thank you!

Customer Service Centre (CSC)

International Electrotechnical Commission

3, rue de Varembé
1211 Genève 20
Switzerland

or

Fax to: **IEC/CSC** at +41 22 919 03 00

Thank you for your contribution to the standards-making process.

A Prioritaire

Nicht frankieren
Ne pas affranchir



Non affrancare
No stamp required

RÉPONSE PAYÉE

SUISSE

Customer Service Centre (CSC)
International Electrotechnical Commission
3, rue de Varembé
1211 GENEVA 20
Switzerland



Q1 Please report on **ONE STANDARD** and **ONE STANDARD ONLY**. Enter the exact number of the standard: (e.g. 60601-1-1)

.....

Q2 Please tell us in what capacity(ies) you bought the standard (tick all that apply). I am the/a:

- purchasing agent
- librarian
- researcher
- design engineer
- safety engineer
- testing engineer
- marketing specialist
- other.....

Q3 I work for/in/as a: (tick all that apply)

- manufacturing
- consultant
- government
- test/certification facility
- public utility
- education
- military
- other.....

Q4 This standard will be used for: (tick all that apply)

- general reference
- product research
- product design/development
- specifications
- tenders
- quality assessment
- certification
- technical documentation
- thesis
- manufacturing
- other.....

Q5 This standard meets my needs: (tick one)

- not at all
- nearly
- fairly well
- exactly

Q6 If you ticked NOT AT ALL in Question 5 the reason is: (tick all that apply)

- standard is out of date
- standard is incomplete
- standard is too academic
- standard is too superficial
- title is misleading
- I made the wrong choice
- other

Q7 Please assess the standard in the following categories, using the numbers:

- (1) unacceptable,
- (2) below average,
- (3) average,
- (4) above average,
- (5) exceptional,
- (6) not applicable

- timeliness.....
- quality of writing.....
- technical contents.....
- logic of arrangement of contents
- tables, charts, graphs, figures.....
- other

Q8 I read/use the: (tick one)

- French text only
- English text only
- both English and French texts

Q9 Please share any comment on any aspect of the IEC that you would like us to know:

.....





Enquête sur les normes

La CEI ambitionne de vous offrir les meilleures normes possibles. Pour nous assurer que nous continuons à répondre à votre attente, nous avons besoin de quelques renseignements de votre part. Nous vous demandons simplement de consacrer un instant pour répondre au questionnaire ci-après et de nous le retourner par fax au +41 22 919 03 00 ou par courrier à l'adresse ci-dessous. Merci !

Centre du Service Clientèle (CSC)

Commission Electrotechnique Internationale

3, rue de Varembé
1211 Genève 20
Suisse

ou

Télécopie: **CEI/CSC** +41 22 919 03 00

Nous vous remercions de la contribution que vous voudrez bien apporter ainsi à la Normalisation Internationale.

A Prioritaire

Nicht frankieren
Ne pas affranchir



Non affrancare
No stamp required

RÉPONSE PAYÉE

SUISSE

Centre du Service Clientèle (CSC)
Commission Electrotechnique Internationale
3, rue de Varembé
1211 GENÈVE 20
Suisse



Q1 Veuillez ne mentionner qu'**UNE SEULE NORME** et indiquer son numéro exact:
(ex. 60601-1-1)
.....

Q2 En tant qu'acheteur de cette norme, quelle est votre fonction?
(cochez tout ce qui convient)
Je suis le/un:

- agent d'un service d'achat
- bibliothécaire
- chercheur
- ingénieur concepteur
- ingénieur sécurité
- ingénieur d'essais
- spécialiste en marketing
- autre(s).....

Q3 Je travaille:
(cochez tout ce qui convient)

- dans l'industrie
- comme consultant
- pour un gouvernement
- pour un organisme d'essais/
certification
- dans un service public
- dans l'enseignement
- comme militaire
- autre(s).....

Q4 Cette norme sera utilisée pour/comme
(cochez tout ce qui convient)

- ouvrage de référence
- une recherche de produit
- une étude/développement de produit
- des spécifications
- des soumissions
- une évaluation de la qualité
- une certification
- une documentation technique
- une thèse
- la fabrication
- autre(s).....

Q5 Cette norme répond-elle à vos besoins:
(une seule réponse)

- pas du tout
- à peu près
- assez bien
- parfaitement

Q6 Si vous avez répondu PAS DU TOUT à Q5, c'est pour la/les raison(s) suivantes:
(cochez tout ce qui convient)

- la norme a besoin d'être révisée
- la norme est incomplète
- la norme est trop théorique
- la norme est trop superficielle
- le titre est équivoque
- je n'ai pas fait le bon choix
- autre(s)

Q7 Veuillez évaluer chacun des critères ci-dessous en utilisant les chiffres
(1) inacceptable,
(2) au-dessous de la moyenne,
(3) moyen,
(4) au-dessus de la moyenne,
(5) exceptionnel,
(6) sans objet

- publication en temps opportun
- qualité de la rédaction.....
- contenu technique
- disposition logique du contenu
- tableaux, diagrammes, graphiques,
figures
- autre(s)

Q8 Je lis/utilise: (une seule réponse)

- uniquement le texte français
- uniquement le texte anglais
- les textes anglais et français

Q9 Veuillez nous faire part de vos observations éventuelles sur la CEI:

.....
.....
.....
.....
.....
.....



LICENSED TO MECON Limited. - RANCHI/BANGALORE
FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY, SUPPLIED BY BOOK SUPPLY BUREAU.

ISBN 2-8318-8486-1



9 782831 884868

ICS 33.180.01
