

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures –

Part 3-38: Examinations and measurements – Group delay, chromatic dispersion and phase ripple

Dispositifs d'interconnexion et composants passifs à fibres optiques –

Procédures fondamentales d'essais et de mesures –

Partie 3-38: Examens et mesures – Retard de groupe, dispersion chromatique et fluctuation de phase





THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2012 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester.

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

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

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

Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

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

About IEC publications

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

Useful links:

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables you to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...).

It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) on-line.

Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

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

A propos de la CEI

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

A propos des publications CEI

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

Liens utiles:

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

La recherche avancée vous permet de trouver des publications CEI en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...).

Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

Just Published CEI - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) en ligne.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures –
Part 3-38: Examinations and measurements – Group delay, chromatic dispersion and phase ripple**

**Dispositifs d'interconnexion et composants passifs à fibres optiques –
Procédures fondamentales d'essais et de mesures –
Partie 3-38: Examens et mesures – Retard de groupe, dispersion chromatique et fluctuation de phase**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX



ICS 33.180.10

ISBN 978-2-83220-115-2

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

CONTENTS

FOREWORD.....	5
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms and abbreviations	7
4 General description	8
5 Apparatus.....	9
5.1 Modulation phase shift method	9
5.1.1 General	9
5.1.2 Variable wavelength source VWS	9
5.1.3 Tracking filter (optional).....	9
5.1.4 Reference branching device RBD1, RBD2	10
5.1.5 Wavelength monitor (optional)	10
5.1.6 Device under test DUT	10
5.1.7 Detectors D1, D2	10
5.1.8 RF generator	11
5.1.9 Amplitude modulator	11
5.1.10 Phase comparator	11
5.1.11 Temporary joints TJ1, TJ2	11
5.1.12 Polarization controller (optional)	11
5.1.13 Reference jumper	12
5.2 Swept wavelength interferometry method	12
5.2.1 General	12
5.2.2 Tunable laser source TLS.....	12
5.2.3 Wavelength monitor	13
5.2.4 Reference branching devices RBD1, RBD2, RBD3	13
5.2.5 Detectors D1, D2	13
5.2.6 Polarization controller	13
5.2.7 Polarization analyzer	13
5.3 Polarization phase shift method.....	13
5.3.1 General	13
5.3.2 Tunable laser source TLS.....	14
5.3.3 RF generator	14
5.3.4 Amplitude modulator	15
5.3.5 Polarization controller	15
5.3.6 Polarization splitter	15
5.3.7 Detectors D1, D2	15
5.3.8 Amplitude and phase comparator	16
6 Measurement procedure	16
6.1 Modulation phase shift method	16
6.1.1 Measurement principle	16
6.1.2 RF modulation frequency.....	16
6.1.3 Test sequence	18
6.1.4 Special notice for measurement of GDR	19
6.1.5 Calculation of relative group delay	19
6.2 Swept wavelength interferometry method	19
6.2.1 Measurement principle	19

6.2.2	Test sequence	20
6.2.3	Special notice for measurement of GDR	20
6.2.4	Calculation of group delay	20
6.3	Polarization phase shift method.....	21
6.3.1	Modulation frequency	21
6.3.2	Wavelength increment	22
6.3.3	Scanning wavelength and measuring CD	22
6.3.4	Calibration	22
6.3.5	Calculation of relative group delay and CD	23
6.4	Measurement window (common for all test methods).....	23
7	Analysis	25
7.1	Noise reduction of group delay measurement.....	25
7.1.1	Averaging	25
7.1.2	Spectral filtering	25
7.2	Linear phase variation	25
7.3	Chromatic dispersion.....	25
7.3.1	General	25
7.3.2	Finite difference calculation	26
7.3.3	Curve fit	26
7.4	Phase ripple	27
7.4.1	General	27
7.4.2	Slope fitting	27
7.4.3	GDR estimation	27
7.4.4	Phase ripple calculation.....	28
8	Examples of measurement	28
8.1	50GHz band-pass thin-film filter	28
8.2	Planar waveguide filter component.....	29
8.3	Tunable dispersion compensator (fiber bragg grating)	30
8.4	Random polarization mode coupling device	30
9	Details to be specified	31
Annex A (informative)	Calculation of differential group delay	32
Bibliography		40
Figure 1	– MPS measurement method apparatus.....	9
Figure 2	– SWI measurement method apparatus.....	12
Figure 3	– PPS measurement method apparatus	14
Figure 4	– Sampling at the modulation frequency.....	18
Figure 5	– Measurement window centred on an ITU wavelength with a defined width	24
Figure 6	– Measurement window determined by the insertion loss curve at 3dB.....	24
Figure 7	– Calculated CD from fitted GD over a 25 GHz optical BW centred on the ITU frequency.....	26
Figure 8	– A 6th order polynomial curve is fitted to relative GD data over a 25 GHz optical BW centred on the ITU frequency	27
Figure 9	– Estimation of the amplitude of the GD ripple and the period	28
Figure 10	– GD and loss spectra for a 50 GHz-channel-spacing DWDM filter.....	28
Figure 11	– Measured GD and loss spectra for planar waveguide filter	29
Figure 12	– Measured CD and loss spectra for planar waveguide filter	29

Figure 13 – Measured GD deviation of a fibre Bragg grating	30
Figure 14 – Measured phase ripple of a fibre Bragg grating	30
Figure 15 – Measured GD for a device with random polarization mode coupling	31
Figure 16 – Measured CD for a device with random polarization mode coupling	31
Figure A.1 – Mueller states on Poincaré sphere	32
Figure A.2 – DGD spectrum for a 50 GHz bandpass filter, measured with 30 pm resolution BW	35
Figure A.3 – DGD versus wavelength for a random polarization mode coupling device (example)	37
Figure A.4 – DGD versus wavelength for a fibre Bragg grating filter (example)	37
Table 1 – Modulation frequency versus wavelength resolution for C-band.....	17
Table A.1 – Example of Mueller set.....	33

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

FIBRE OPTIC INTERCONNECTING DEVICES AND PASSIVE COMPONENTS – BASIC TEST AND MEASUREMENT PROCEDURES –

Part 3-38: Examinations and measurements – Group delay, chromatic dispersion and phase ripple

FOREWORD

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

International Standard IEC 61300-3-38 has been prepared by subcommittee 86B: Fibre optic interconnecting devices and passive components, of IEC technical committee 86: Fibre optics.

This first edition cancels and replaces the IEC/PAS 61300-3-38 published in 2007. This edition constitutes a technical revision.

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

FDIS	Report on voting
86B/3394/FDIS	86B/3438/RVD

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.

The list of all parts of IEC 61300 series, published under the general title, *Fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures* can be found on the IEC website.

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

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

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

FIBRE OPTIC INTERCONNECTING DEVICES AND PASSIVE COMPONENTS – BASIC TEST AND MEASUREMENT PROCEDURES –

Part 3-38: Examinations and measurements – Group delay, chromatic dispersion and phase ripple

1 Scope

This part of IEC 61300 describes the measurement methods necessary to characterise the group delay properties of passive devices and dynamic modules. From these measurements further parameters like group delay ripple, linear phase deviation, chromatic dispersion, dispersion slope, and phase ripple can be derived. In addition, when these measurements are made with resolved polarization, the differential group delay can also be determined as an alternative to separate measurement with the dedicated methods of IEC 61300-3-32.

2 Normative references

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

IEC 60050-731, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 731: Optical fibre communication*

IEC 61300-3-29, *Fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures – Part 3-29: Examinations and measurements – Measurement techniques for characterizing the amplitude of the spectral transfer function of DWDM components*

3 Terms and abbreviations

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60050-731 and IEC 61300-3-29 apply, together with the following.

BW	Bandwidth: the spectral width of a signal or filter.
CD	Chromatic dispersion (in ps/nm): change of group delay over wavelength: $CD = d(GD)/d\lambda$
D	Detector
DGD	Differential group delay (in ps): difference in propagation time between two orthogonal polarization modes
DUT	Device under test
DWDM	Dense wavelength division multiplexing
δ	Step size of the VWS during a wavelength swept measurement
f_{RF}	Modulation frequency
GD	Group delay (in ps): time required for a signal to propagate through a device
GDR	Group delay ripple (in ps): the amplitude of ripple of GD
LN	LiNbO ₃

LPV	Linear phase variation (in deg)
λ_c	Centre channel or nominal operating wavelength for a component
MPS	Modulation phase shift
PBS	Polarising beam splitter
PMD	Polarization mode dispersion (in ps): average value of DGD over wavelength
PPS	Polarization phase shift
PSP	Principle state of polarization
Φ	Phase delay
RBD	Reference branching device
SOP	State of polarization
SSE	Source spontaneous emission
SWI	Swept wavelength interferometry
$\Delta\theta$	Phase ripple
TDC	Tunable dispersion compensator
TJ	Temporary joint
TLS	Tunable laser source
VWS	Variable wavelength source

4 General description

This document covers transmission measurements of the group delay properties of passive devices and dynamic modules. In order to interpret the group delay properties, it is essential to also have the amplitude spectral measurement available. For this reason, loss measurements are also covered to the extent that they are required to make proper dispersion measurements.

The methods described in this procedure are intended to be applicable in any wavelength band (C, L, O, etc.) although examples may be shown only in the C band for illustrative purposes.

This document is separated into two sections, one concentrating on measurement methods, and one concentrating on analysis of the measurement data. The measurement methods covered in this document are the modulation phase shift method, the swept-wavelength interferometry method and the polarization phase shift method. The modulation phase shift method is considered the reference method. The methods are selected particularly because of their ability to provide spectrally resolved results, which are often necessary for passive components and especially for wavelength-selective devices.

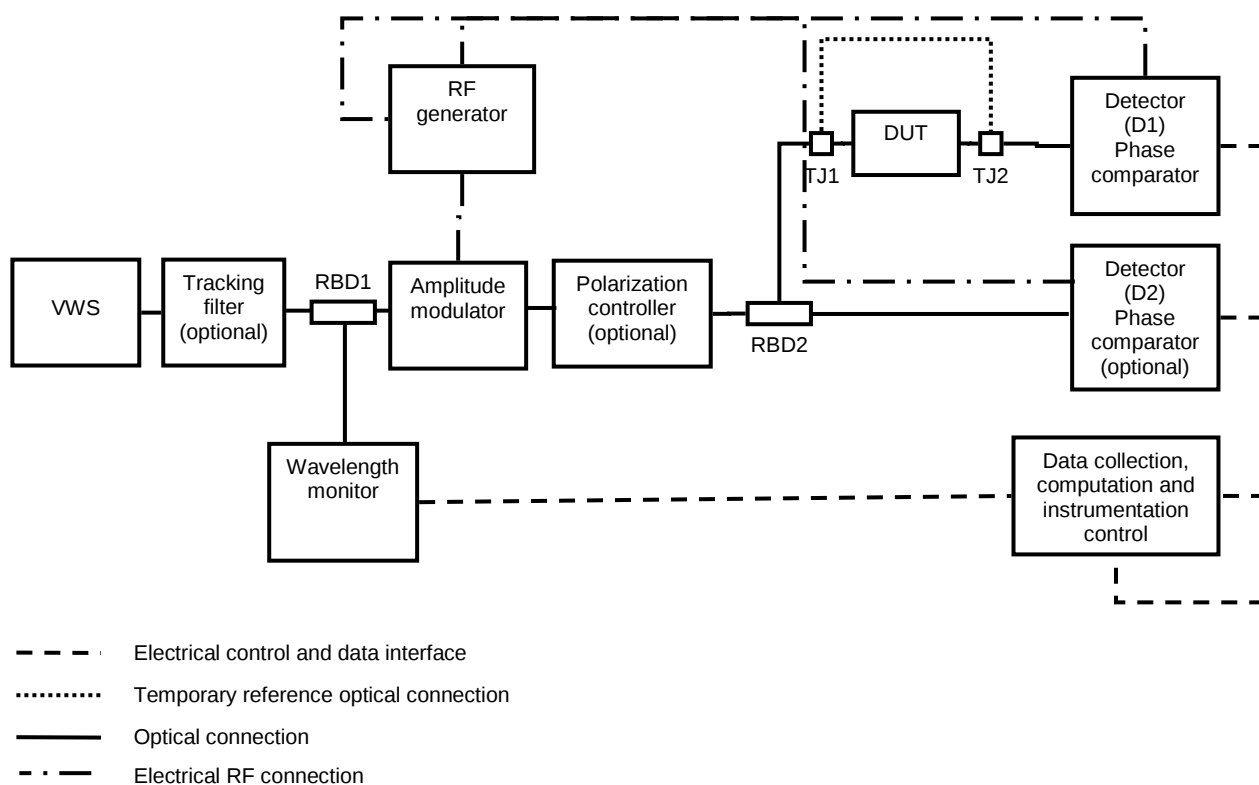
The appropriate measurement parameter to evaluate the group delay ripple, and the method of estimating the phase ripple from the measurement result of GDR are shown in 7.4. The phase ripple is important as a measure of the influence that GD of an optical device has on the transmission quality since many tunable dispersion compensators use the interference effect where ripple is a significant effect.

5 Apparatus

5.1 Modulation phase shift method

5.1.1 General

The measurement set-up for the characterisation of the group delay (GD) properties of optical components is shown in Figure 1. A detailed explanation of the various components of this system and their functions is contained in 5.1.2 to 5.1.13.



IEC 986/12

Figure 1 – MPS measurement method apparatus

5.1.2 Variable wavelength source VWS

The variable wavelength source (VWS) is a polarized light source that can select a specific output wavelength and can be tuned across a specified wavelength range. The power stability at any of the operating wavelengths shall be sufficient so as not to cause significant errors in the phase comparators. The relative accuracy and repeatability of wavelength, as determined by the VWS and wavelength monitor together, shall be accurate to 3 pm for each point in the measuring range and the absolute wavelength accuracy should satisfy the wavelength specifications of the device under test. The linewidth of the source shall be less than 100 MHz. The tuning range of the VWS shall cover the entire spectral region of the device and the source shall also be free of mode hopping over the tuning range. The output power of the VWS shall be sufficient to provide enough signal to ensure good comparison of the phase.

The minimum increment of the wavelength of the VWS should be adjusted to one tenth of expected GDR period of the DUT.

5.1.3 Tracking filter (optional)

The tracking filter may be used for any DUT measurements if the dynamic range of the VWS and the detector does not allow for measuring dynamic range of at least 40 dB due to the

shape of the DUT and the broadband source spontaneous emission (SSE) of the VWS. The filter shall track the VWS so as to provide the maximum SSE suppression and the maximum transmitted power as the VWS is scanned across the measurement region. The spectral shape of the filter shall provide enough out of band attenuation to allow for 40 to 50 dB dynamic range at the transmission detector.

5.1.4 Reference branching device RBD1, RBD2

The configuration of the RBD is 1×2 or 2×2 . If its configuration is 2×2 , one port of the RBD shall be terminated to have a return loss better than 50 dB. The splitting ratio of the RBD shall be stable with wavelength. It shall also be insensitive to polarization. The polarization sensitivity of transmission attenuation shall be less than one tenth of the device wavelength dependency of attenuation or less than 0,1 dB. The directivity shall be at least 10 dB higher than the maximum return loss. The split ratio shall be sufficient to provide the dynamic range for the measurement of the transfer function and the power necessary for the wavelength monitor to operate correctly.

5.1.5 Wavelength monitor (optional)

In this test procedure, the wavelength accuracy of the source needs to be closely monitored. If the tuning accuracy of the VWS is not sufficient for the measurement, a wavelength monitor is required. For this measurement method, it is necessary to measure the spectral peak of any input signal within the device BW to an accuracy of 3 pm. Acceptable wavelength monitors include an optical wavelength monitor or a gas absorption cell (such as an acetylene cell). If a gas absorption cell is used, the wavelength accuracy of the VWS must be sufficient to resolve the absorption lines. The VWS must be sufficiently linear between the absorption lines.

Included under this specification, is the wavelength repeatability of the VWS + monitor. It should be understood by the operator that if the test apparatus has 0,1 ps of ripple with a 30 pm period, then a random 3 pm wavelength variation from reference scan to device scan can result in as much as 0,03 ps of GD noise.

5.1.6 Device under test DUT

For the purposes of this document, the test ports shall be a single “input-output” path. The method described can be extrapolated to obtain a single measurement system capable of handling an $m \times n$ device. The device shall be terminated on either pigtailed or with connectors. Because this measurement set up is very sensitive to reflections, and is useful for detecting reflections in the DUT it is important that reflections are not introduced by the measurement system.

In many cases, the characteristics of DWDM components are temperature dependent. This measurement procedure assumes that any such device is held at a constant temperature throughout the procedure. The absolute accuracy of the measurement may be limited by the accuracy of any heating or cooling device used to maintain a constant temperature. For example, if a device is known to have a temperature dependence of 0,01 nm / °C, and the temperature during the procedure is held to a set temperature ± 1 °C; then any spectral results obtained are known to have a total uncertainty of 0,02 nm due to temperature.

5.1.7 Detectors D1, D2

The detectors consist of an optical detector, the associated electronics, and a means of connecting to an optical fibre. The use of a detector (D2) is considered optional, but provides correction for any instability in the GD of the instrument setup between the modulator and the DUT between Step 3 and Step 4 of 6.1.3. The optical connection may be a receptacle for an optical connector, a fibre pigtail, or a bare fibre adapter. The back-reflection from detectors D1 and D2 shall be minimised. The preferred option would be to use an APC connector. It should be noted that the use of an APC connector would contribute approximately 0,03 dB of PDL to the measurement if terminated in air.

The dynamic range and sensitivity of the detectors shall be sufficient for the required measurement range, given the power level provided by the modulated source. The linearity of the detectors shall be sufficient to provide accurate representation of the modulated signal. The detector shall transfer the optical modulation phase to the RF output phase with good stability and little dependence on the optical signal level.

Where during the sequence of measurements a detector shall be disconnected and reconnected the coupling efficiency for the two measurements shall be maintained to at least the accuracy of the mated connector.

5.1.8 RF generator

The RF Generator delivers an electrical signal that is used for driving the intensity modulator. In addition, the signal is delivered to the phase comparator in detectors D1 and D2 as a reference signal. The RF Generator produces a waveform with a single dominant Fourier component, for example, a sinusoidal wave modulation. Typically, a sinusoidal signal with a frequency in the range of 100 MHz up to 3 GHz is used. The RF generator shall have sufficient frequency accuracy and stability for the required measurement accuracy, considering that the frequency provides the time base for the GD measurement.

5.1.9 Amplitude modulator

The amplitude modulator uses the modulated signal from the RF generator to induce the equivalent amplitude modulation on a continuous wave optical signal. The modulator converts the modulated signal from the RF generator to a modulated optical signal. The modulator shall have sufficient linearity to produce a good sinusoidal modulation. The modulation amplitude should be matched to the dynamic range of the detector system.

5.1.10 Phase comparator

The phase comparator is built into the detectors D1 and D2, which compare the phase of the modulated optical signal and the RF reference signal. Typically, a network analyser, or lock-in amplifier is used as a phase comparator. A method known as phase sensitive detection is used to single out the component of the signal at a specific reference frequency and phase. Noise signals at frequencies other than the reference frequency are rejected and do not affect the phase measurement. The RF signal level shall not affect the phase measurement.

5.1.11 Temporary joints TJ1, TJ2

Temporary joints are specified to connect the test input signal to the device under test to the device output to the transmission detector (D1).

Examples of temporary joints are typically connectors or splices. However other methods such as vacuum chucks, or micromanipulators may be applied. Due to the high sensitivity to back reflections, it is necessary to ensure that all of these joints have back-reflection < -50 dB.

5.1.12 Polarization controller (optional)

The modulated laser signal is optionally sent to a polarization controller, wherein the polarization can be adjusted to the 4-Mueller-states located on the surface of the Poincaré sphere, three of them on the equator of the Poincaré sphere and separated by 90 degree consisting of the 0°, 45° and 90° linear polarization states, and the fourth state on the pole of the Poincaré sphere for circular polarization. If the DUT exhibits polarization mode dispersion, averaging results from orthogonal polarization states allows the GD average over all input polarization states to be determined. From a set of GD measurements at all the 4-Mueller-states, the differential group delay (DGD) can be calculated. The polarization controller shall be able to provide satisfactory polarization stability over the wavelength range of the measurement.

5.1.13 Reference jumper

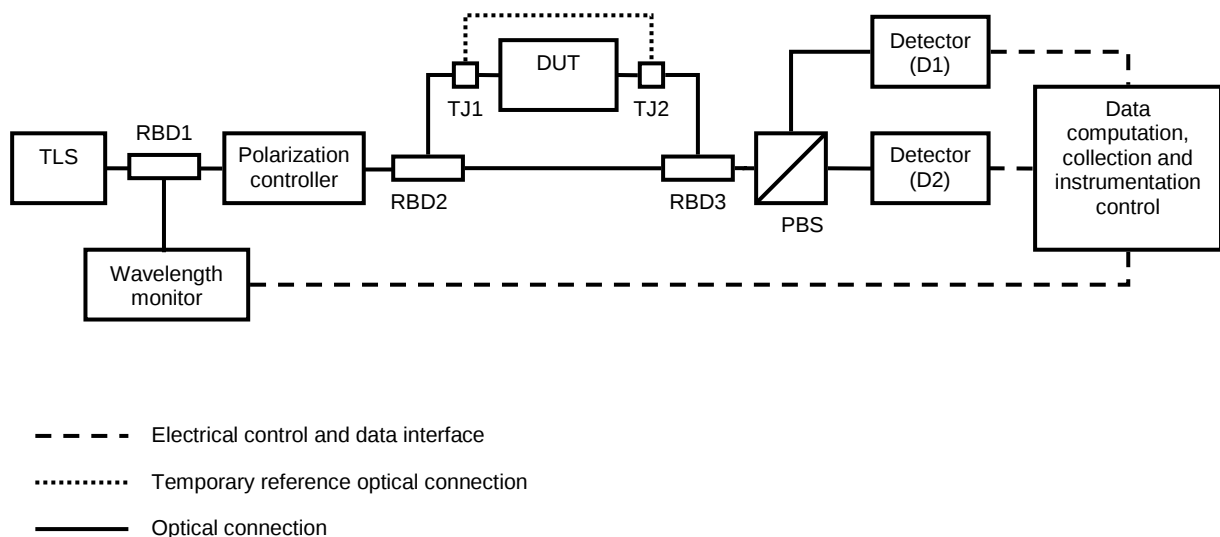
The reference jumper is a single-mode fibre. The optical connection may be an optical connector, a fibre pigtail, or a bare fibre. The reference jumper must have the same optical connection as the DUT.

5.2 Swept wavelength interferometry method

5.2.1 General

The measurement set-up for this method is shown in Figure 2. A detailed explanation of the various components of this system and their functions is contained in 5.2.2 to 5.2.7. The setup shown illustrates a transmission measurement of a DUT with two optical ports.

The measurement of GD is usually of interest to determine its dependence on wavelength and polarization. However, the GD of optical fibre and other components of optical fibre networks is also sensitively dependent on outside parameters such as temperature, pressure, mechanical stress, and noise. Therefore a setup for measuring GD should provide for stability against fibre movement and external changes during the measurement. Since the SWI method relies on tracing the optical phase, which is very sensitive to GD and GD changes in a fibre, such provision is particularly important for this method.



IEC 987/12

Figure 2 – SWI measurement method apparatus

5.2.2 Tunable laser source TLS

The SWI method uses coherent interference, so a tunable laser source is necessary to provide the variable wavelength signal. The TLS must be tunable across the required wavelength range. Considering typical coherence and wavelength resolution requirements, the line-width shall be less than 1 MHz. A typical device length of about 10m, including patch cords, will give an interferogram period of about 20 MHz. Accurate characterization of this requires a substantially smaller resolution. Typically closely spaced measurements are required (depending on the length and GD range of the DUT as discussed in 6.2.1), so it is highly recommended to perform the measurements during continuous wavelength scanning by the source. Therefore the setup shall provide specified control and monitoring of the wavelength while sweeping.

5.2.3 Wavelength monitor

If the TLS does not itself provide adequate wavelength accuracy, this shall be achieved with the wavelength monitor. The monitor improves absolute wavelength accuracy and relative wavelength accuracy for each measurement point during the wavelength scan.

5.2.4 Reference branching devices RBD1, RBD2, RBD3

The branching devices, RBD2 and RBD3, are used to establish the interferometer by splitting the optical path so that part of the light passes through the DUT and the other part passes along a reference path. The light from the two paths is then recombined so that it interferes at the detectors. These couplers will typically have a 50:50 coupling ratio. Further branching devices may be used to tap light for monitoring, as for the wavelength monitor. These should be selected to provide adequate signal for the monitoring function. The branching devices have 1×2 or 2×2 configuration. Unused ports of the RBD shall be terminated to give less than -50 dB back-reflection.

5.2.5 Detectors D1, D2

The detectors are used to trace the optical power with respect to wavelength. As described below, the recommended configuration produces two such traces for light at two orthogonal polarization states. The traces will generally yield oscillations in power with very short wavelength period as explained in 5.2.1, so that a high density of measurements vs. wavelength will be required. Therefore a high-speed data acquisition detection system is recommended. The discussion below assumes that the output signal corresponds to optical power. Since relative changes in power will be evaluated, the detectors should have good linearity, and care should be taken to avoid approaching saturation.

5.2.6 Polarization controller

To obtain sufficient interference signal from the interferometer, it must be assured that light from the two paths combines with the same polarization, since signals with orthogonal polarization will not produce interference. Since in general the polarization state of the light at the DUT output will be unknown, some control of the polarization is required. The polarization controller and polarization analyzer of 5.2.6 combine to satisfy this function, as described in Clause 5. Generally the polarization controller is used to establish the polarization at the DUT input and to “balance” the power at the two detectors from the reference path of the interferometer. The polarization controller shall be able to provide satisfactory polarization stability over the wavelength range of the measurement, for example by using zero-order retarding plates. The combination of polarization controller and analyzer also permits the calculation of DGD from a set of GD measurements at different polarization conditions.

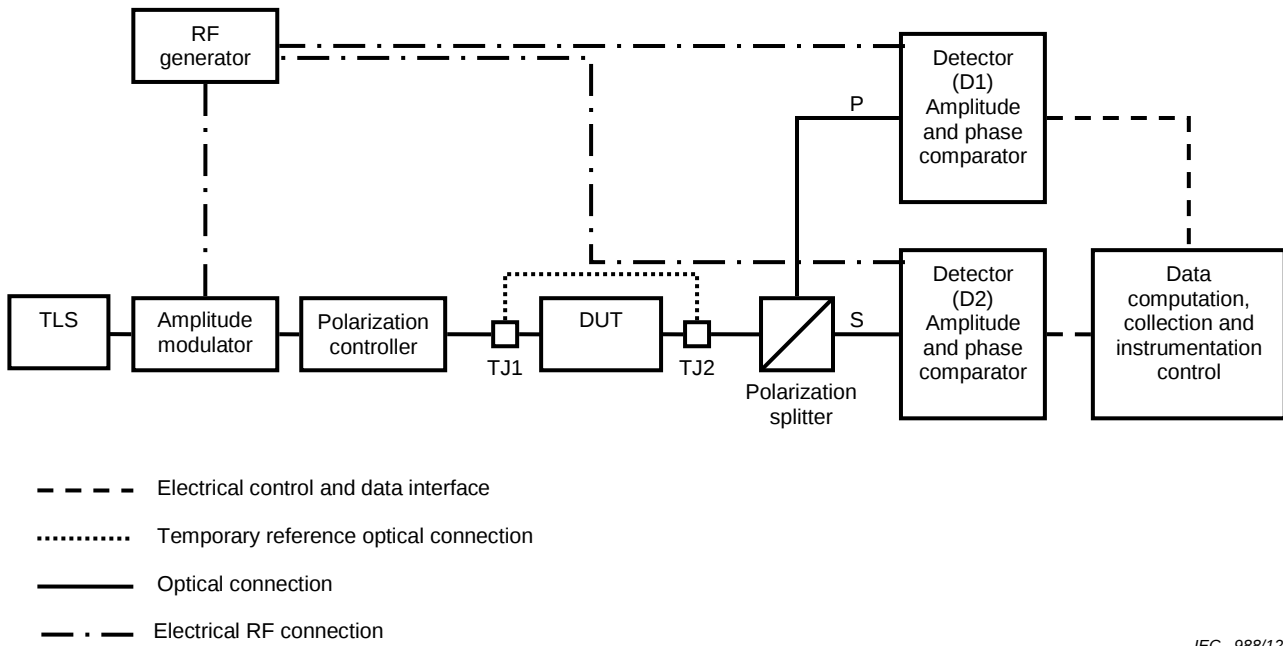
5.2.7 Polarization analyzer

The polarization analyzer is the second part of the configuration to assure favourable interference conditions, based on polarization. A practical realization is to use the polarising beam splitter (PBS) in combination with the two detectors. When the polarization controller of 4.2.5 assures that similar power from the reference arm is present at both detectors, then the light from the DUT will also be split into two respective components with the same polarization at the detector as the reference light. This assures a good interference signal.

5.3 Polarization phase shift method

5.3.1 General

Figure 3 shows a block diagram of the polarization phase shift method (PPS). A detailed explanation of the various components of this system and their functions is contained in 5.3.2 to 5.3.8.



IEC 988/12

Figure 3 – PPS measurement method apparatus

5.3.2 Tunable laser source TLS

A tunable laser source is used as the light source. The wavelength tuning range of the laser shall be sufficient to cover the wavelength range to be measured. To obtain a good SNR and wavelength resolution of the measurement result, the laser should have sufficient power for the required signal-to-noise ratio (SNR) of the result and the spectral line width should be narrow enough for the required wavelength resolution. Generally, the completely self-contained temperature controlled and current controlled wavelength stabilized external cavity laser unit is employed. The output of the tunable laser source is connected to an optical intensity modulator by a polarization maintaining fibre.

The wavelength increment of the VWS shall be optimized for the period of the group delay ripple (GDR) of the DUT.

5.3.3 RF generator

The RF generator provides a modulated pattern for the optical intensity modulator. Some of the modulated pattern 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 modulated pattern 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 CD measurement resolution shall 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 optical spectrum spread. The effective wavelength resolution, $\Delta\lambda$ (nm), is restricted by the sidebands, and is generally given as:

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

where

λ is wavelength (nm)

f is the modulation frequency (GHz), and

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

In addition, the GD measurement resolution, $\Delta\text{GD}(\text{ps})$, is also restricted by the modulation frequency, f , and is typically given as:

$$\Delta\text{GD} = \frac{\Delta\phi \times 10^3}{2\pi f} \quad (2)$$

where

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

f is modulation frequency (GHz)

5.3.4 Amplitude modulator

The optical intensity modulator modulates the intensity of light from the tunable laser source synchronized to the modulated pattern from RF signal source. The optical performances such as insertion loss, on-off extinction ratio and polarization extinction ratio shall satisfy the required value over the wavelength range to be measured. In order to achieve these performances, generally a LiNbO_3 (LN) modulator is used. A polarization maintaining fibre is used as an input fibre in order to connect with a tunable laser source. A driving voltage is generally determined from the half-wavelength voltage (V_π) of the LN modulator, and the output power of the RF signal source is adjusted so that the degree of optical intensity modulation will be approximately 20 %.

5.3.5 Polarization controller

The polarization controller is used to launch light of specific states of polarization (SOP) to the DUT. The polarization controller consists of three components: a polarizer, a 1/4-wave plate, and a 1/2-wave plate. Rotating the set of two retardation plates can generate any polarization state. The angle-adjustable resolution shall be less than $\pm 0,1$ degree and the polarization extinction ratio shall be more than 20 dB over the wavelength range to be measured.

5.3.6 Polarization splitter

The polarization splitter is placed after the DUT. The output light is separated into two orthogonally polarized signals, P- and S-polarised lights. Each signal is led to the optical detectors. The polarization splitter consists of a non-isotropic crystal such as a calcite prism possessing a high polarization extinction ratio of more than 20 dB. The insertion loss shall be less than 1 dB. The optical performances such as polarization extinction ratio and insertion loss of the polarization splitter shall satisfy the required value over the wavelength range to be measured.

5.3.7 Detectors D1, D2

The optical receivers convert the modulated light from the DUT into an electrical signal. A PIN photodiode, with a good linearity and a low noise density of approximately $10 \text{ pA}/(\text{Hz})^{1/2}$, is generally used. The PIN photodiode must have response characteristics sufficient to respond to the modulation frequency of the RF signal source. In addition, to ensure a high signal to noise ratio, a broadband and low noise amplifier shall be used after the optical detectors.

5.3.8 Amplitude and phase comparator

The amplitude and phase comparator measures amplitude and phase by comparing the signals for each polarized wave with the reference signal from the RF signal source. The GD tau (ps) is calculated from the phase using the following equation:

$$\tau = \frac{\phi \times 10^3}{2\pi f} \quad (3)$$

where

ϕ is phase (radians) and

f is the modulation frequency (GHz)

The reference signal, which is a part of the modulated pattern of the RF signal source, is provided to the amplitude and phase comparator. The reference signal shall be synchronised to the modulated pattern. The total phase accuracy including the frequency stability of the RF signal source shall be less than $\pm 0,3$ degree or sufficient to ensure adequate measurement precision.

6 Measurement procedure

6.1 Modulation phase shift method

6.1.1 Measurement principle

GD, τ_g , is defined as the derivative of the optical phase Φ_{opt} with respect to its angular frequency $\omega_{\text{opt}} = 2\pi f_{\text{opt}}$ according to

$$\tau_g(\omega_0) = \left. \frac{d\Phi_{\text{opt}}(\omega_{\text{opt}})}{d\omega_{\text{opt}}} \right|_{\omega_0} = \left. \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi_{\text{opt}}(f_{\text{opt}})}{df_{\text{opt}}} \right|_{f_0} \quad (4)$$

In the MPS method, a wavelength tunable source is modulated in amplitude with a sinusoidal waveform at a radio (RF) /microwave frequency f_{RF} , typically in a range of 100 MHz to 3 GHz. The modulated optical signal is transmitted to the device under test and detected in the receiver. The phases of the RF signal relative to the reference modulation source $\phi_{\text{RF1}}, \phi_{\text{RF2}}, \dots, \phi_{\text{RFn}}$ are recorded at wavelengths $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ corresponding to optical frequencies $f_{\text{opt1}}, f_{\text{opt2}}, \dots, f_{\text{optn}}$. These measurements are used to determine relative group delay, that is the change in group delay over a wavelength interval. From measurements of the RF phases at two adjacent wavelengths λ_i to λ_j , the change in GD, $\Delta\tau_g(\lambda_i, \lambda_j)$ can be obtained as

$$\Delta\tau_g(\lambda_i, \lambda_j) = \frac{\phi_{\text{RF}}(\lambda_j) - \phi_{\text{RF}}(\lambda_i)}{2\pi f_{\text{RF}}} \quad (5)$$

6.1.2 RF modulation frequency

The RF modulation frequency has to be selected carefully. A trade-off has to be made between GD noise on the measurement trace and the spectral resolution of the curve. Table 1 displays recommended maximum RF modulation frequencies for a certain required spectral resolution.

Particular attention should be paid to the relation between wavelength sample spacing and the modulation frequency. In particular, for devices showing high dispersion, the GD difference over the wavelength sample spacing limits the maximum modulation frequency that can be used without risking phase shifts of more than 180 degrees, which lead to ambiguous results due to phase-wrap errors. The modulation frequency should satisfy

$$f_{\text{RF}} < \frac{1}{\Delta \tau_{\text{max}}} \quad (6)$$

where $\Delta \tau_{\text{max}}$ is the maximum GD difference over the sampling spacing.

In the case where the spectral resolution due to modulation is equivalent to the wavelength sample, the measurements acquired at successive wavelengths can be averaged to synthesize (i.e. to give a result similar to the use of) a higher value of f_{RF} , because the phase contributions from the upper side-band of one acquisition are cancelled by the equal but opposite phase contributions of lower side-band of an adjacent acquisition.

Figure 4 illustrates an example case of three acquisition points where the wavelength sample spacing is equal to the modulation frequency. Each ellipse depicts the optical spectrum at each wavelength snapshot. As described above, the three successive snapshots can be averaged resulting in a single equivalent snapshot with an effective modulation frequency equal to $3f_{\text{RF}}$ and an effective central wavelength equal to λ_2 (i.e. mean of $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$).

Table 1 – Modulation frequency versus wavelength resolution for C-band

Modulation Frequency (GHz)	Wavelength resolution (pm)
0,1	1,6
0,2	3,2
0,3	4,8
0,5	8,0
1,0	16,0
2,0	32,1
3,0	48,1

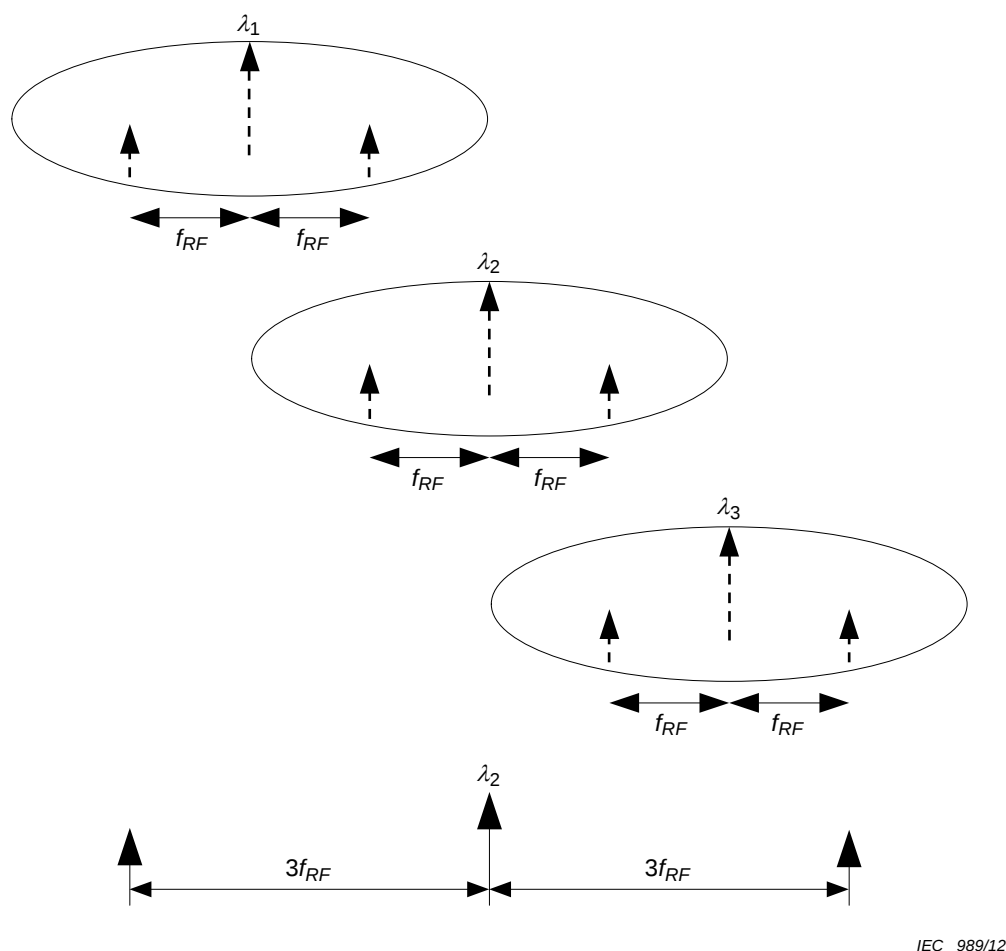


Figure 4 – Sampling at the modulation frequency

6.1.3 Test sequence

Using the setup shown in Figure 1, follow these steps:

- (1) A sinusoidal waveform is generated by an RF generator. The frequency f_{RF} is typically selected in a range of 100MHz to 3GHz. This sinusoidal waveform will be used to drive the amplitude modulator and to synchronise phase detector D1 and D2. Optionally, the frequency f_{RF} is selected to be related to the wavelength sample spacing such that consecutive samples overlap as shown in figure 4.
- (2) Optionally, the polarization controller is adjusted to be at 0° linear polarization. The actual orientation of this polarization is arbitrary, but usually refers to the state generated in the polarization controller. Further SOP are referenced to this one in Step 7.
- (3) With no DUT attached, connect a fibre patch-cord between TJ1 and TJ2. Scan the wavelength of the TLS, recording the wavelengths and phases from D1 and D2 for points with the selected wavelength sample spacing. The results are an array of values $(\lambda_i, \varphi_{Ref}(D1)_i, \varphi_{Ref}(D2)_i)$. This provides a “zero-loss” reference for normalizing the phase of the DUT signal.
- (4) Attach the DUT at TJ1 and TJ2. Scan the wavelength of the TLS, recording the wavelengths and phases from D1 and D2 for points with the selected wavelength sample spacing. The results are an array of values $(\lambda_i, \varphi_{DUT}(D1)_i, \varphi_{DUT}(D2)_i)$. This provides a phase of the DUT signal.
- (5) Steps 3 and 4 can be repeated individually to reduce random noise in the phase measurements by “averaging” the multiple scans.

- (6) Optionally, as described in 6.1.2, if the modulation frequency f_{RF} is equal to the wavelength sample spacing, a boxcar smoothing can be applied to achieve the measurements as if it were acquired at higher modulation frequencies.
- (7) As an optional but recommended extension, steps 3 to 6 can be duplicated with the polarization controller at 45° and 90° linear polarization states, and the fourth state on the pole of the Poincaré sphere for circular polarization. This allows determination of the GD average over all input states of polarization.

6.1.4 Special notice for measurement of GDR

The wavelength resolution shall be chosen carefully to optimize for the period of group delay ripple (GDR) of DUT. The wider wavelength resolution reduces the group delay noise but degrades ability to resolve group delay ripple due to smoothing.

6.1.5 Calculation of relative group delay

In 6.1.3, step 3 and step 4 provide a “zero-loss” reference and the phase measurements of the DUT signal. The relative GD at the wavelength λ_i can be calculated as shown

$$\tau_g(\lambda_i) = \frac{(\varphi_{DUT}(D2)_i - \varphi_{Ref}(D2)_i) - (\varphi_{DUT}(D1)_i - \varphi_{Ref}(D1)_i)}{2\pi f_{RF}} 10^{12} \quad (7)$$

where φ is the phase in radians, f_{RF} is the modulation frequency in Hz and GD is in ps.

6.2 Swept wavelength interferometry method

6.2.1 Measurement principle

This method uses an optical interferometer and a tunable coherent light source to measure the dependence on wavelength of the optical phase of the light, φ , transferred by the DUT. The absolute GD is then calculated according to its definition as the derivative of phase with respect to optical frequency,

$$GD = \frac{d\varphi}{d\omega} \quad (8)$$

Here the phase φ refers to the phase of the optical (electromagnetic) wave, and ω is the optical frequency, expressed in rad/s. For example, the electrical field strength of light propagating in vacuum in the x-direction could be expressed as

$$E(x,t) = E_0 \cos\left(2\pi\left(\frac{x}{\lambda}\right) - \omega t\right) \quad (9)$$

where the argument of the cosine function is the phase, φ , and the amplitude of the field E_0 is proportional to the square root of the optical power.

Note that this method is different to Method D of IEC 60793-1-42, called “interferometry”, for measuring the CD of optical fibres, in which a low-coherence light source is used. In that Method D, it is the length of the reference arm of the interferometer that is varied to match the optical length of the arm including the DUT. That method is not appropriate for measuring components like filters requiring high wavelength resolution, because a broadband light source is needed to provide good resolution of GD.

The interferometer measures the relative change vs. wavelength in the phase of the light from the DUT with respect to the light through the reference path. When the phase is such that the light combines constructively, the power is higher at the detector than when only light from the reference path is present. When the light combines destructively, the power is lower.

Generally the power level will oscillate as the wavelength is scanned, because the phase advances at different rates in the two paths as the wavelength is changed, if they have different optical length. The greater the path length difference, the more rapidly the detected power changes with wavelength. The period of the oscillation, $\Delta\lambda$ is given by

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / \Delta L \quad (10)$$

where ΔL is the optical path length difference. Note that for a difference of 1 m, this gives a period of only 2,4 pm. If the difference is 10 m, then the period is only 0,24 pm. Thus it can be seen that a setup flexible enough to measure different devices without reconfiguration should be able to measure with a wavelength resolution smaller than 0,1 pm.

After recording the trace of power vs. wavelength, the interferogram, the dependence of phase on optical frequency can be extracted, which then allows calculating the absolute GD. The GD is then also a function of frequency or wavelength.

6.2.2 Test sequence

Using the setup shown in Figure 2, follow these steps:

- (1) With no DUT attached, so that TJ1 and TJ2 are not connected, adjust the polarization controller to obtain equal power at D1 and D2. This establishes the first input state of polarization. It is recommended to make this adjustment with the TLS set to the middle of the wavelength range to be measured. Directivity should be better than 50 dB for the branching device.
- (2) Attach the DUT at TJ1 and TJ2. The reflectance spectrum of the DUT can also be measured, for instance by using a 2 x 2 coupler at RBD2 and attaching TJ2 to the additional port on the left side of RBD2. For measurements with low uncertainty, it is best to wait a few minutes after attaching for the temperature and position of the fibre pigtails to stabilize.
- (3) Scan the wavelength of the TLS, recording the wavelengths and signals from D1 and D2, for points with spacing 0,1 pm or smaller, as required by the length of the DUT. The result is an array of values (λ_i , $P1_i$, $P2_i$).
- (4) Optionally, a normalization measurement with a fibre patch-cord between TJ1 and TJ2 can also be made. This provides a “zero-loss” reference for normalizing the amplitude of the DUT signal, allowing accurate measurement of the attenuation. This measurement also produces an array of values (λ_i , $N1_i$, $N2_i$), where N is the power trace from each detector.
- (5) Steps 3 and 4 can be repeated to reduce random noise in the spectra by “averaging” the multiple scans. Because it is not desired to smooth out the interference oscillations in this process however, the averaging should be performed with the results of analysis on the raw data arrays of steps 3 and 4.
- (6) As an optional but recommended extension, steps 2 to 5 can be duplicated for the second polarization state adjusted to the orthogonal state compared with the first polarization state, using the polarization controller. This allows determination of the GD averaged over all input states of polarization and of the DGD.

6.2.3 Special notice for measurement of GDR

The wavelength resolution shall be chosen carefully to optimize for the period of group delay ripple (GDR) of DUT. The wider wavelength resolution reduces the group delay noise but degrades ability to resolve group delay ripple due to smoothing.

6.2.4 Calculation of group delay

The result of step 3 above actually yields two interferograms, given by the arrays (λ_i , $P1_i$) and (λ_i , $P2_i$). (Including the results of step 6, there are four such interferograms in total.) These are separately processed in the same way in the following calculations. Each will yield a GD spectrum, which may differ if the DUT has non-zero DGD.

The interferogram, which is here expressed in terms of $\omega = 2\pi c / \lambda$ as $P(\omega)$, has values

$$P(\omega) = R(\omega) + D(\omega) + 2\sqrt{R(\omega)}\sqrt{D(\omega)}\cos(\phi(\omega)) \quad (11)$$

where R is the power at the detector from the reference path, D is the power at the detector from the DUT and ϕ is the optical phase difference between the two optical paths. All of these are functions of ω . To obtain the third term of this equation with the phase information, the interferogram $P(\omega)$ is high-pass filtered. The cut-off of the high-pass filtering can be estimated by using a Fourier transform to identify the interferogram frequencies related to the GD of the device. The Hilbert transform of this term is then used to obtain the ω -dependent values of amplitude and phase:

$$2\sqrt{R(\omega)}\sqrt{D(\omega)} \text{ and } \phi(\omega), \text{ respectively.} \quad (12)$$

These arrays can then be averaged over repeated wavelength scans if required, as mentioned in step 5 of 6.2.2. The high number of data points can now also be reduced to the desired wavelength resolution, using boxcar averaging.

The GD is now obtained as:

$$\text{GD}\left(\frac{\omega_{i+1} + \omega_i}{2}\right) = \frac{\phi(\omega_{i+1}) - \phi(\omega_i)}{\omega_{i+1} - \omega_i} \quad (13)$$

This calculation is performed for the interferograms of both detectors and the results are averaged to form the polarization-averaged GD spectrum for this input polarization state, which may then be expressed as a function of ω or λ . The fully averaged GD spectrum is obtained by also averaging the results for GD obtained from the same analysis on the results of step 6. Note that, given a zero length reference measurement, the GD values are absolute and indicate the length of the device.

The insertion loss of the DUT can also be determined from these data, after performing a similar analysis on the normalization results of step 4 to obtain $2\sqrt{R(\omega)}\sqrt{D_N(\omega)}$ as the amplitude from the Hilbert transform of the corresponding $N(\omega)$ data. Then the polarization-averaged transfer T_{ave} of the DUT is given by

$$T_{\text{ave}}(\omega) = \sum \frac{R(\omega)D(\omega)}{R(\omega)D_N(\omega)} \quad (14)$$

where the summation is over values from the two, or four if step 6 is used, polarization-resolved interferograms.

The average insertion loss of the device is then given by the average of this from the interferograms of both detectors, expressed in dB.

$$\text{IL}(\omega) = -10/\log(T_{\text{ave}}(\omega)) \quad (15)$$

6.3 Polarization phase shift method

6.3.1 Modulation frequency

The modulation frequency shall be chosen based on the required wavelength resolution and GD or CD noise. For more information, refer to 6.3.2.

The wavelength resolution shall be chosen carefully to optimize for the period of group delay ripple (GDR) of DUT. The wider wavelength resolution reduces the group delay noise but degrades ability to resolve group delay ripple due to smoothing.

6.3.2 Wavelength increment

Two wavelengths are required to obtain a CD value because the wavelength differentiation in this wavelength increment, $\Delta\lambda$, is used when calculating a CD. The phase difference that can be measured with the phase comparator is within ± 180 degrees. Therefore, the maximum GD difference, $\Delta\tau_{\max}$ that can be measured between the adjoining wavelengths is given by the following expression.

$$\Delta\tau_{\max} \leq \left| \pm \frac{180}{360} \times \frac{10^3}{f} \right| = \frac{10^3}{2f} \quad (16)$$

This wavelength increment, $\Delta\lambda$, will be called wavelength step size. To measure up to a certain value, the wavelength step size is decided as follows.

$$\Delta\lambda \leq \left| \pm \frac{\Delta\tau_{\max}}{CD_{\max}} \right| \quad (17)$$

where

- $\Delta\lambda$ is wavelength step size (nm),
- $\Delta\tau_{\max}$ is the maximum GD of the DUT in ps,
- f is the modulation frequency in GHz, and
- $CD_{\max}$ is the maximum CD to be measured in ps/nm.

The minimum increment of wavelength of VWS shall be chosen to optimize for the period of the group delay ripple (GDR) of DUT.

6.3.3 Scanning wavelength and measuring CD

The tunable laser source is used to perform a wavelength sweep along the desired wavelength range, and the GD value is calculated at each wavelength. In addition, the CD value of the DUT can be calculated from the wavelength differentiation of the GD value in each measurement wavelength based on the GD value that has been obtained.

This method uses a pair of orthogonal polarized waves (the 0-degree and 90-degree linearly polarized waves). The 0-degree and 90-degree 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 GD 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 ($|T_{11}|_{\text{mea}}^2$ and $|T_{21}|_{\text{mea}}^2$, respectively) and the GDs ($d\phi_{11}/d\omega_{\text{mea}}$ and $d\phi_{21}/d\omega_{\text{mea}}$, respectively) for the 0-degree linearly polarized wave are measured. For the 90-degree linearly polarized wave, the P- and S-polarized light amplitudes ($|T_{12}|_{\text{mea}}^2$ and $|T_{22}|_{\text{mea}}^2$) and the GDs ($d\phi_{12}/d\omega_{\text{mea}}$ and $d\phi_{22}/d\omega_{\text{mea}}$) are measured.

6.3.4 Calibration

A calibration is performed on a single-mode fibre whose length is less than 1 m before the DUT measurement. First, adjust the 1/4- and 1/2-wave plates to generate the 0-degree linearly polarized wave that matches the P-polarized wave of the polarization splitter. Next, generate the 90-degree linearly polarized wave that matches the S-polarized wave of the polarization splitter. After that, at a specific measurement wavelength, measure the amplitude and GD characteristics for each of two polarized waves (the P- and S-polarized light) that are

separated by the polarization splitter while the 0-degree and 90-degree linearly polarized waves are alternately launched. That is, the P- and S-polarized light amplitudes ($|T_{11}|_{\text{cal}}^2$ and $|T_{21}|_{\text{cal}}^2$, respectively) and the GDs ($d\Phi_{11}/d\omega_{\text{cal}}$ and $d\Phi_{21}/d\omega_{\text{cal}}$, respectively) for the 0-degree linearly polarized wave are measured. For the 90-degree linearly polarized wave, the P- and S-polarized light amplitudes ($|T_{12}|_{\text{cal}}^2$ and $|T_{22}|_{\text{cal}}^2$) and GDs ($d\Phi_{12}/d\omega_{\text{cal}}$ and $d\Phi_{22}/d\omega_{\text{cal}}$) are measured. The CD value is calculated from the measured values using the expression described in 6.3.5.

6.3.5 Calculation of relative group delay and CD

The P- and S-polarized light GDs are calculated using measured values from 6.3.3 and 6.3.4.

$$\begin{aligned}
 \text{P-polarized light GD: } \frac{d\Phi_{kl}}{d\omega} &= \frac{d\Phi_{kl}}{d\omega_{\text{mea}}} - \frac{d\Phi_{11}}{d\omega_{\text{cal}}} \quad kl = 11 \text{ and } 12 \\
 \text{Average GD in P-polarized light: } \frac{d\Phi_{\text{ave1}}}{d\omega} &= \left(\frac{d\Phi_{11}}{d\omega} + \frac{d\Phi_{12}}{d\omega} \right) / 2 \\
 \text{S-polarized light GD: } \frac{d\Phi_{mn}}{d\omega} &= \frac{d\Phi_{mn}}{d\omega_{\text{mea}}} - \frac{d\Phi_{22}}{d\omega_{\text{cal}}} \quad mn = 21 \text{ and } 22 \\
 \text{Average GD in S-polarized light: } \frac{d\Phi_{\text{ave2}}}{d\omega} &= \left(\frac{d\Phi_{21}}{d\omega} + \frac{d\Phi_{22}}{d\omega} \right) / 2
 \end{aligned} \tag{18}$$

The GD and CD values on each wavelength are calculated by the next expressions.

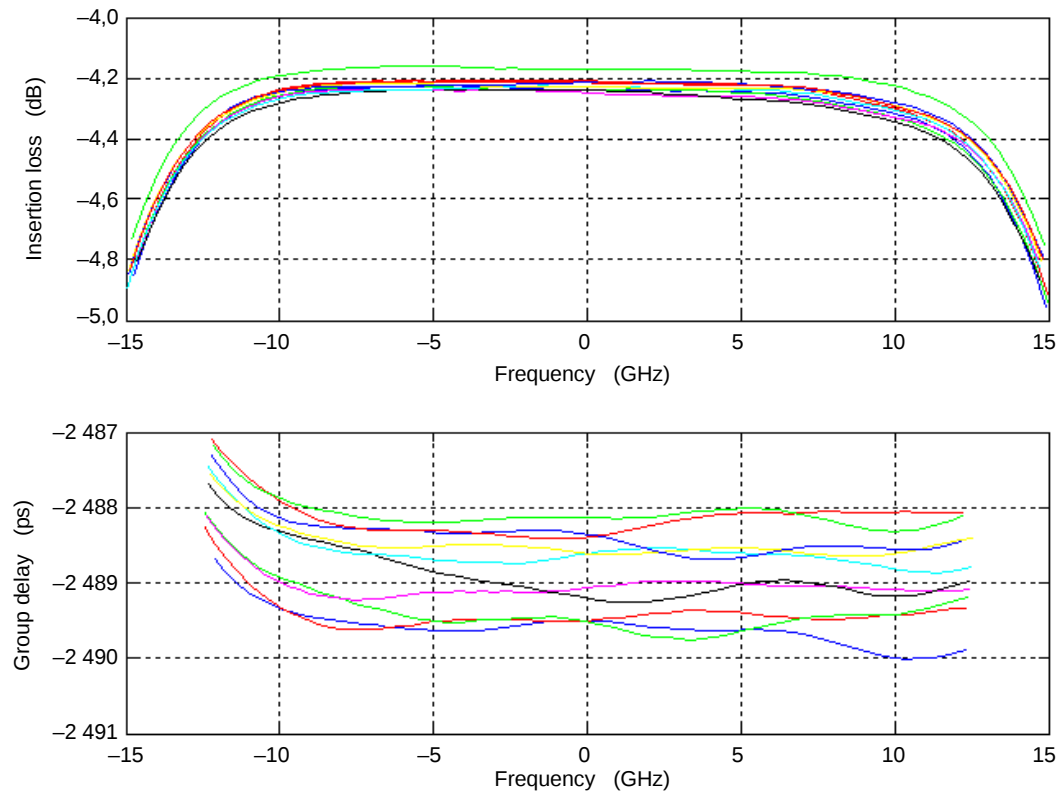
$$\begin{aligned}
 \text{GD}_{\text{average}} \text{ that does not depend on polarization: } \text{GD}(\lambda) &= \left(\frac{d\Phi_{\text{ave1}}}{d\omega} + \frac{d\Phi_{\text{ave2}}}{d\omega} \right) / 2 \\
 \text{CD}_{\text{average}} \text{ that does not depend on polarization: } \text{CD}(\lambda) &= \frac{(\text{GD}(\lambda + \Delta\lambda) - \text{GD}(\lambda - \Delta\lambda))}{2 \times \Delta\lambda}
 \end{aligned} \tag{19}$$

The error of measurement caused by PMD can be excluded from the measurement result by obtaining averaged GD and CD that doesn't depend on the polarization.

6.4 Measurement window (common for all test methods)

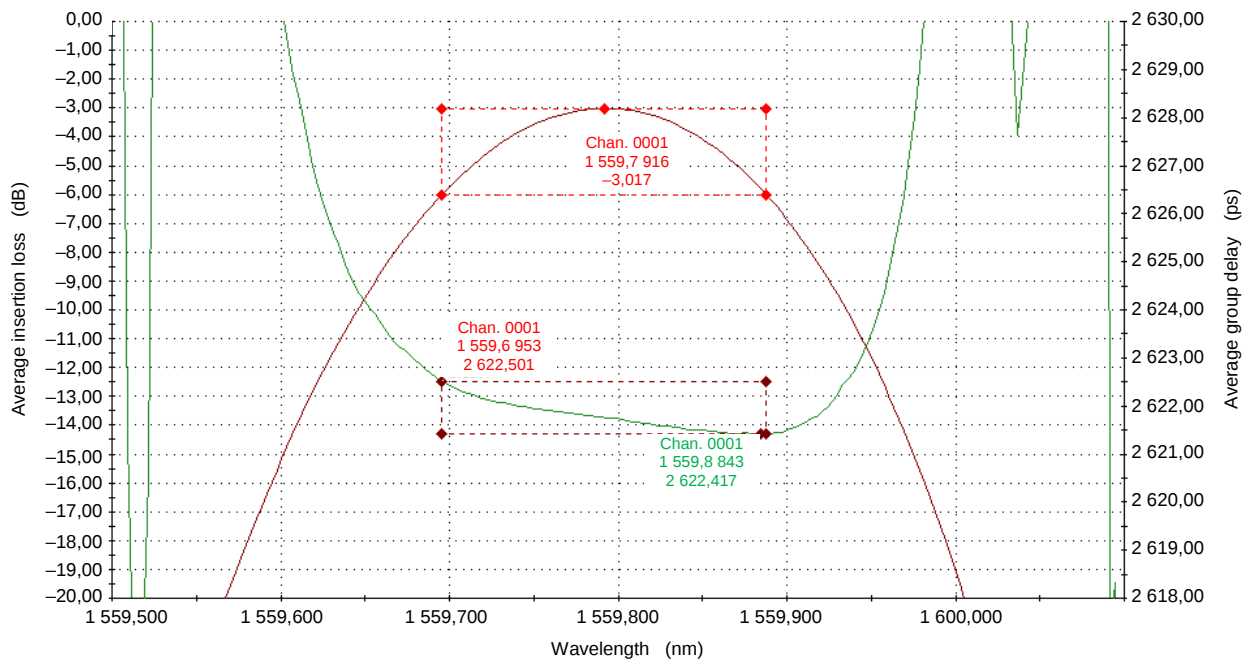
The spectral width of the measurement window is typically given in the specification of the DUT. Generally, the measurement window is defined in two different ways. First, the measurement window is centred on an ITU wavelength with a defined width. For example, the GD is required to be analysed within a 25 GHz optical BW centred on the ITU frequency as shown in Figure 5 for a multiple channel DUT. Each channel is plotted against the corresponding ITU frequency.

Secondly, it also may be required to analyse the dispersion properties of the DUT in a measurement window that is defined by the loss properties of the DUT. For example, the DUT is a filter with a wavelength dependent loss as given in Figure 6. The dispersion measurement will be carried out afterwards in a window that ranges from λ_1 to λ_2 . λ_1 and λ_2 are given by the minus x dB points of the loss curve. Typical values for x are in the range 0,5 dB to 5 dB.



IEC 990/12

Figure 5 – Measurement window centred on an ITU wavelength with a defined width



IEC 991/12

Figure 6 – Measurement window determined by the insertion loss curve at 3dB

7 Analysis

7.1 Noise reduction of group delay measurement

7.1.1 Averaging

Multiple measurements of the phase difference between the reference signal and the detected optical signal may be averaged. If the noise is non-deterministic the noise level will decrease by the square root of the number of averages. Averaging does not sacrifice the wavelength resolution, but has a time trade-off.

7.1.2 Spectral filtering

Filter methods may be applied for reducing the measurement noise. The most commonly applied filter is averaging over a defined spectral window. Where DWDM components are being characterized typical widths of such windows are 5 to 10 pm. Broadband components may allow window widths of up to 1 nm and more. It has to be taken into account that the optical signal is spectrally broadened due to the RF modulation and therefore already provides a spectrally averaged measurement value. For these reasons it is required to state the applied RF frequency and the width of the spectral filtering window in the measurement protocol.

For DWDM components, when averaging over a spectral region, multiple measurement points over a spectral window are averaged. This delivers smoother measurement curves by reducing the spectral resolution. Particular care has to be taken not to average out relevant details of the measurement.

7.2 Linear phase variation

If the phase response of a linear phase system is strictly linear, it will cause a delay, but no distortion. Any deviation from linearity within the BW of the signal will distort the signal.

The linear phase system is expressed as

$$\phi(f_{\text{opt}}) = \phi(f_{\text{opt0}}) + 2\pi\tau_g(f_{\text{opt}} - f_{\text{opt0}}) \quad (20)$$

where the GD τ_g is a constant. For most components, a linear fit to the phase is performed, and then this linear curve is subtracted from the original phase. The remaining phase value is the departure from linear phase.

7.3 Chromatic dispersion

7.3.1 General

It is well known that CD is the derivative of the GD as a function of wavelength.

$$CD(\lambda) = \frac{d\tau_g(\lambda)}{d\lambda} \quad (21)$$

However, in practice, this derivative must be performed numerically.

$$CD(\lambda_i) = \frac{\tau_g(\lambda_{i+1}) - \tau_g(\lambda_{i-1})}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}} \quad (22)$$

where $i = 1, 2, \dots, n$. $\Delta\lambda = \lambda_{i+1} - \lambda_i = \lambda_i - \lambda_{i-1}$ represents the wavelength sample spacing. If the wavelength sample spacing $\Delta\lambda$ is relatively small, the GD noise will be amplified in the CD

calculation. There are many ways to minimise the calculated CD noise. Normally, two methods are recommended.

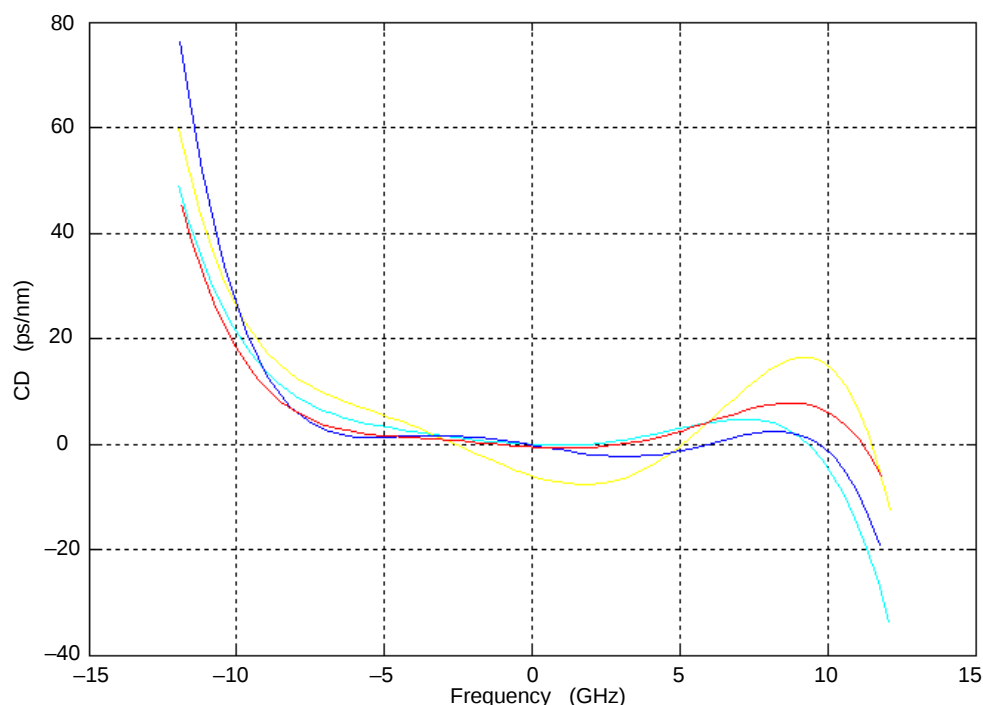
7.3.2 Finite difference calculation

The spectral filtering (or averaging) method is applied to reduce the GD noise before performing the CD calculation. It is normally applied for narrow band devices. The number of measurement points filtered (or averaged) over a spectral window depends on the CD noise improvement, avoiding averaging out relevant details of the measurement and not distorting the processed GD curve.

7.3.3 Curve fit

A curve is fitted, by least mean squares procedure, to the GD data over a measurement window defined in 5.1.5. CD is calculated from the differentiation of the fitted GD curve with respect to wavelength in order to reduce the GD noise. It is normally applied to a broadband device, i.e. a long spool of fibre. However, if the GD variation is relatively smooth in the measurement window, this method can also apply for the narrow band device. One example of a multiple channel DUT is shown in Figure 7. CD is processed in the following ways for each channel.

- 1) A 6th order polynomial curve is fitted, by least mean squares procedure, to group delay data over a 25 GHz optical BW centred on the ITU frequency as shown in Figure 8.
- 2) The offset frequency, in GHz, from the ITU grid frequency is used for the frequency axis to minimize decimal place requirements for good fit. The fit is within $\pm 0,5$ ps of the raw data.
- 3) CD is calculated from the differentiation of the fitted GD curve with respect to wavelength. The wavelength step used for calculation is 6 pm.



IEC 992/12

Figure 7 – Calculated CD from fitted GD over a 25 GHz optical BW centred on the ITU frequency

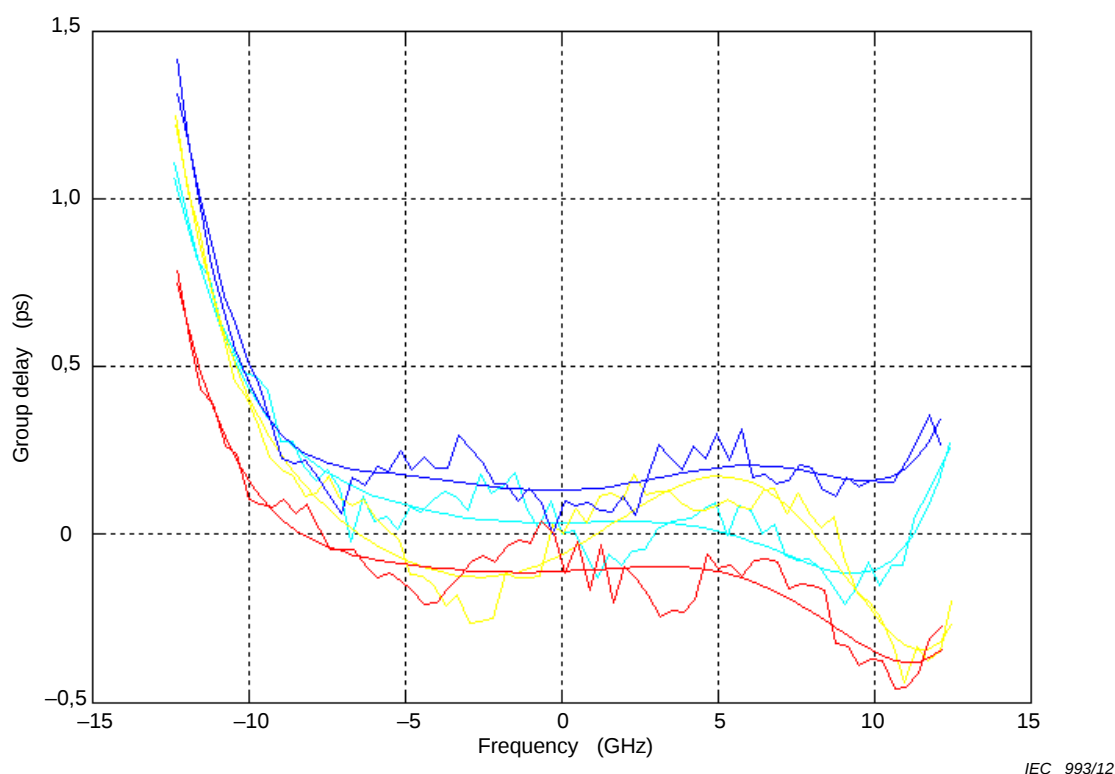


Figure 8 – A 6th order polynomial curve is fitted to relative GD data over a 25 GHz optical BW centred on the ITU frequency

7.4 Phase ripple

7.4.1 General

The method of estimating the phase ripple from the measurement data of GD is shown below. This is only valid for DWDM dispersion compensators.

7.4.2 Slope fitting

Calculate linear-fit value of group delay measurement results for the bandwidth specified in the DUT specifications (unless otherwise specified, the 3 dB bandwidth of the insertion loss characteristics), using least-square method and get the deviation between linear and group delay. These values contain group delay ripples.

7.4.3 GDR estimation

Determine the amplitude and period of the group delay ripple using the above result. The amplitude should be determined over two cycles of the group delay ripple. The maximum amplitude in the measurement range should be chosen as the peak-to-peak group delay ripple. The period should be chosen as the average over several cycles including the maximum amplitude. Determine the period based on the crossings of the mean value of group delay for each ripple. Figure 9 shows an example of GDR estimation. This only works if the GDR is plotted against frequency.

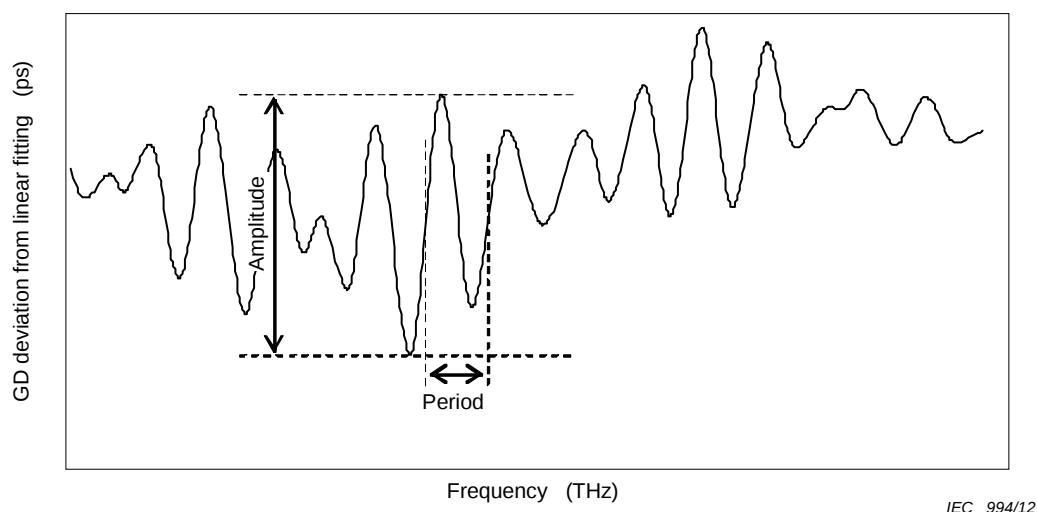


Figure 9 – Estimation of the amplitude of the GD ripple and the period

7.4.4 Phase ripple calculation

Calculate peak-to-peak phase ripple ($\Delta\theta$) from group delay ripple using following equation.

$$\Delta\theta = f_{\text{period}} * A_{\text{rip}} \text{ (unit: radians)} \quad (23)$$

where,

A_{rip} peak-to-peak group delay ripple (unit: s)
 f_{period} period of the group delay ripple (unit: Hz).

8 Examples of measurement

8.1 50GHz band-pass thin-film filter

Example results for the GD and IL spectra of a 50 GHz band- pass thin-film filter are shown in Figure 10.

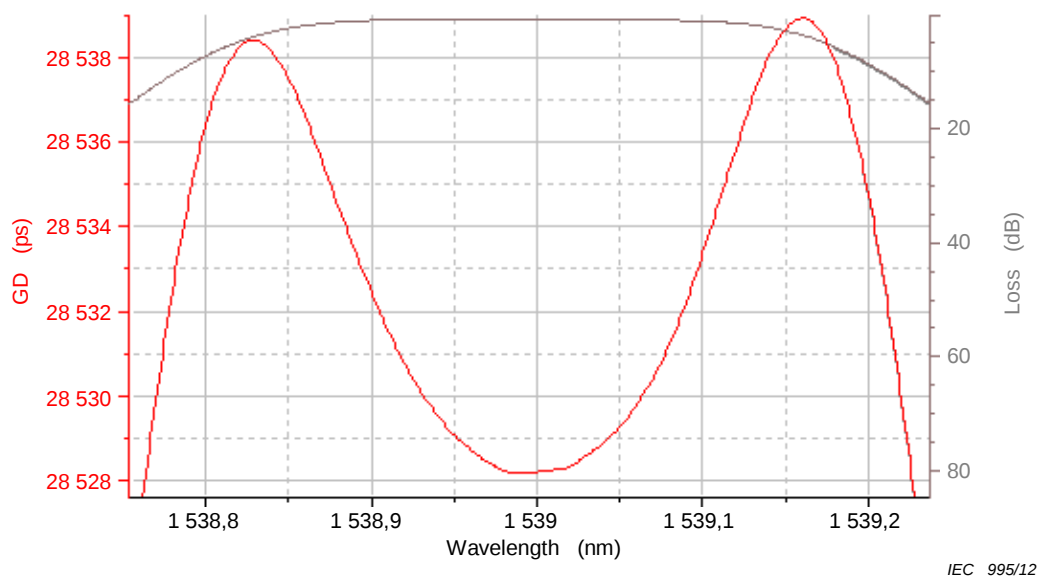


Figure 10 – GD and loss spectra for a 50 GHz-channel-spacing DWDM filter

8.2 Planar waveguide filter component

Figures 11 and 12 show the examples of GD and CD measurement for a planar waveguide filter component.

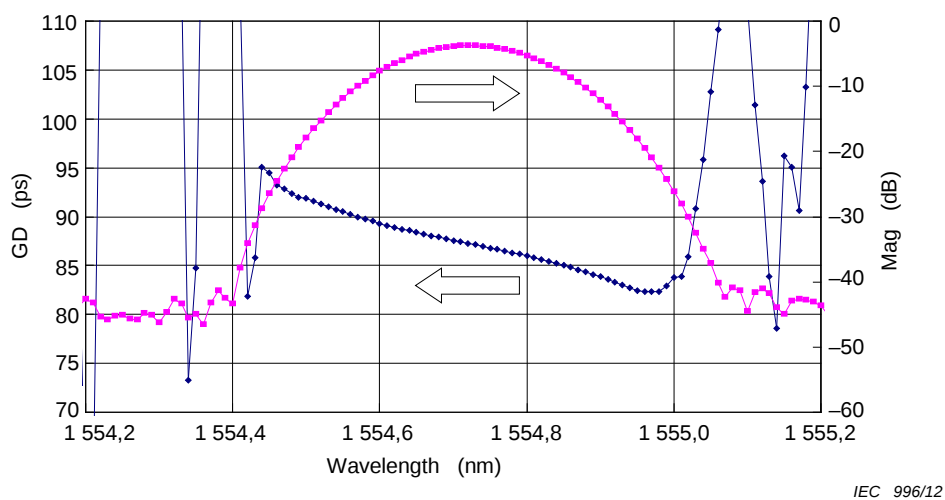


Figure 11 – Measured GD and loss spectra for planar waveguide filter

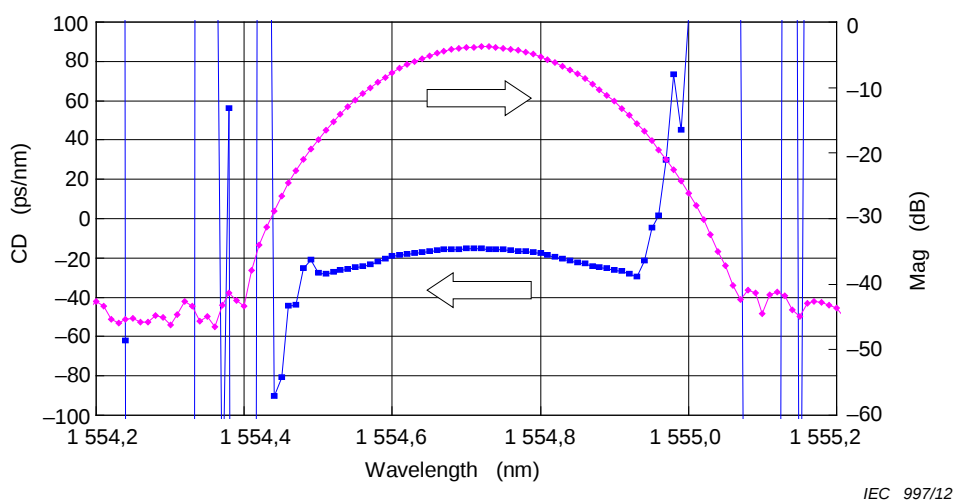
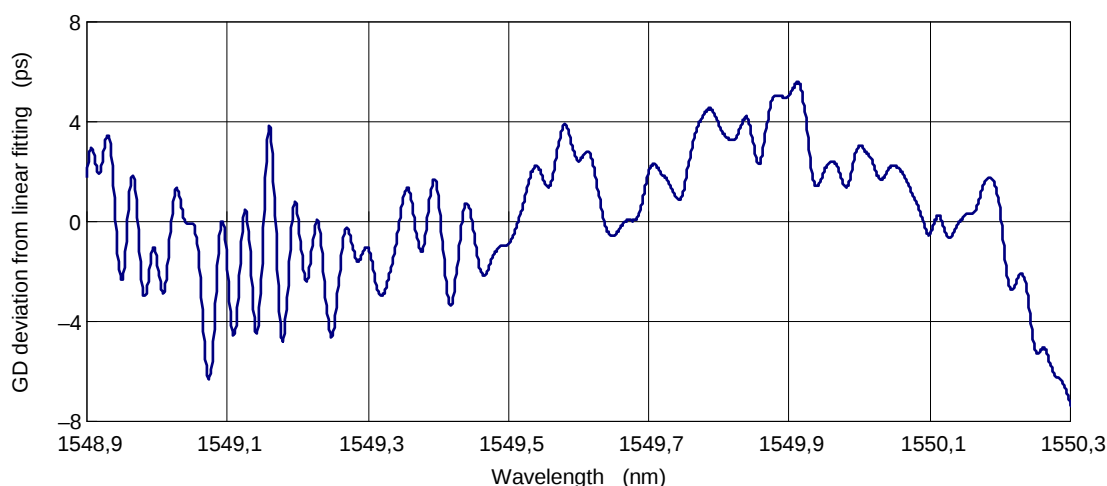


Figure 12 – Measured CD and loss spectra for planar waveguide filter

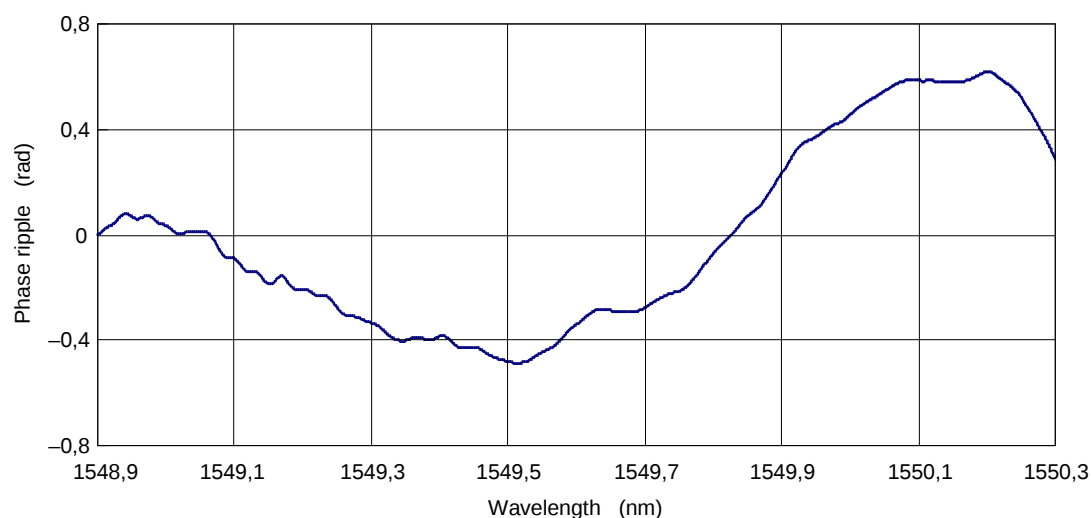
8.3 Tunable dispersion compensator (fiber bragg grating)

Figures 13 and 14 show the examples of GD deviation from linear fitting and phase ripple measurement for a fibre Bragg grating using Polarization average MPS method. The modulation frequency f_{RF} is 500 MHz.



IEC 998/12

Figure 13 – Measured GD deviation of a fibre Bragg grating



IEC 999/12

Figure 14 – Measured phase ripple of a fibre Bragg grating

8.4 Random polarization mode coupling device

Figure 15 shows a GD measurement example for a device with random polarization mode coupling, showing the advantage of averaging GD over the polarization states. Without averaging, the GD curve can vary by one half of the DGD.

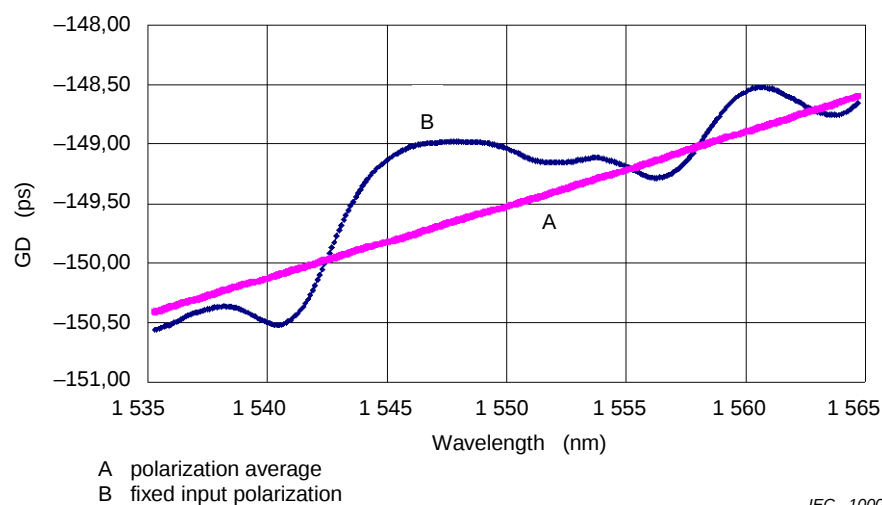


Figure 15 – Measured GD for a device with random polarization mode coupling

Figure 16 shows a CD measurement example for a device with random polarization mode coupling.

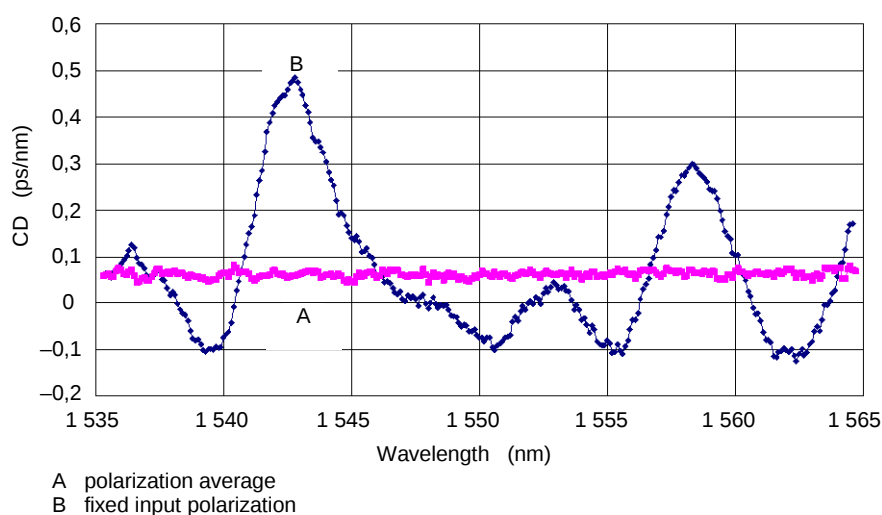


Figure 16 – Measured CD for a device with random polarization mode coupling

9 Details to be specified

The following details shall be specified.

- Measurement uncertainty
- Test method used
- Wavelength range
- Wavelength accuracy
- Wavelength resolution
- Environmental characteristics (T, P, H)
- RF modulation frequency
- Number of averages of phase measurement
- Spectral averaging window

Annex A (informative)

Calculation of differential group delay

A.1 General

The methods of this standard use polarized light sources. For the measurement of components exhibiting polarization dependence, which is often the case, the measurement should be performed for a sufficient set of input polarizations to assure determination of the polarization-average GD spectrum, as described in 6.1. Such a procedure also provides sufficient measured data to determine the DGD spectrum, $\text{DGD}(\lambda)$, as described in this Annex. The intention of this Annex is to support the simultaneous measurement of GD and DGD with the same measurement apparatus. Methods dedicated specifically to DGD or PMD are described in IEC 61300-3-32 and IEC 61282-9.

A.2 Calculation of DGD from measurements made with the MPS method at 4 states of input polarization

This method requires repeating steps 3 to 6 of 6.1.3 for four different input states of polarization, chosen to a Mueller set of input SOPs. A Mueller set of input SOPs is most easily described on the Poincaré sphere, as shown in figure A.1.

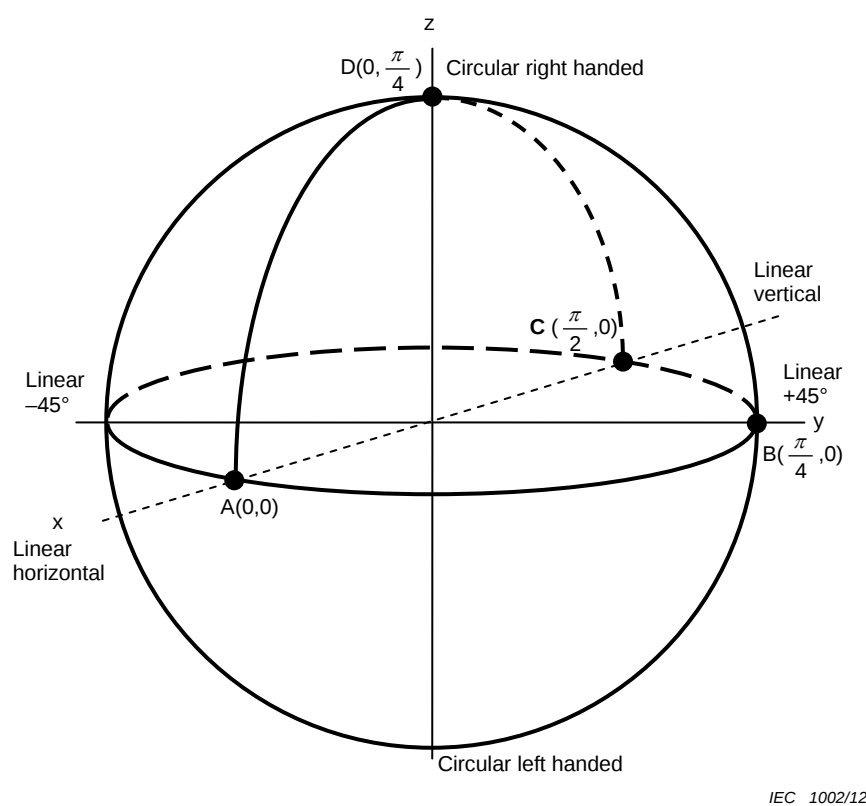


Figure A.1 – Mueller states on Poincaré sphere

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 A.1. 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 normalised 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 normalised Jones vector, j_0 . The parameter, μ , is the phase difference of the x and y elements of that vector.

$$s_0 = \begin{bmatrix} \cos 2\theta \\ \sin 2\theta \cos \mu \\ \sin 2\theta \sin \mu \end{bmatrix} \quad j_0 = \begin{bmatrix} \cos \theta \exp[-j\mu/2] \\ \sin \theta \exp[j\mu/2] \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Table A.1 shows the example of Mueller set.

Table A.1 – Example of Mueller set

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

For each, position, A, B, C, and D, measure the phase shifts (radians), designated, $\phi_A(\lambda)$, $\phi_B(\lambda)$, $\phi_C(\lambda)$, $\phi_D(\lambda)$, respectively, as in 6.1.3.

Calculate the average phase of the two PSPs, $\phi_{RF}(\lambda)$, as:

$$\phi_{RF}(\lambda) = \frac{\phi_A(\lambda) + \phi_C(\lambda)}{2} \quad (\text{A.2})$$

Adjust the measured phase values by the average phase as:

$$\begin{aligned} \phi_{RF,A}(\lambda) &= \phi_A(\lambda) - \phi_{RF}(\lambda) \\ \phi_{RF,B}(\lambda) &= \phi_B(\lambda) - \phi_{RF}(\lambda) \\ \phi_{RF,D}(\lambda) &= \phi_D(\lambda) - \phi_{RF}(\lambda) \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

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

$$\delta_{RF}(\lambda) = 2 \arctan \left\{ \left[\tan^2(\phi_{RF,A}(\lambda)) + \tan^2(\phi_{RF,B}(\lambda)) + \tan^2(\phi_{RF,D}(\lambda)) \right]^{1/2} \right\} \quad (\text{A.4})$$

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

$$\text{DGD}(\lambda) = 10^3 \frac{\delta_{RF}(\lambda)}{2\pi f} \quad (\text{A.5})$$

A.3 Calculation of DGD from measurements made with the MPS method while scanning the states of input polarization, “all states method”

This measurement may be made by scanning the state of input polarization with the polarization controller of Figure 1, while fixing the VWS at fixed wavelength steps, and measuring the relative GD for a large set of SOP. The DGD, expressed in units of ps, is

determined as the difference between the maximum and minimum GD values at a particular wavelength.

To obtain the desired accuracy, it is necessary to assure that the set of SOP is sufficiently large, by scanning at a sufficiently fast rate or for a long enough time, and sufficiently polarization-resolved, by averaging the individual samples over sufficiently short time with respect to the polarization scanning rate.

An improvement in the noise level and thus accuracy of the DGD determination can be obtained by evaluating the complete distribution of GD samples over the SOP, instead of basing the determination only on the two values of maximum and minimum GD in the set. When the state of input polarization is scanned in a random manner, there is a simple relationship between the standard deviation of the distribution of GD values and the range between the minimum and maximum values. As can be seen for instance by regarding the representation of the SOP on the surface of the Poincaré sphere, the density of polarization states with respect to the difference between the components of the polarization along two orthogonal states of polarization is constant. When these two orthogonal states are chosen to be the two principal states of polarization, PSP, of the component, this means there is a constant density of polarization states versus measured GD, over the range from minimum to maximum GD. Therefore the size of this range can be obtained from the standard deviation of the GD samples according to the equation:

$$\text{DGD} = \text{GD}_{\text{max}} - \text{GD}_{\text{min}} = 2\sqrt{3}\sigma \quad (\text{A.6})$$

where σ is the standard deviation of the GD samples.

A.4 Calculation of DGD from measurements made with the SWI method

The SWI method described in 5.2, including the measurement at two orthogonal input states of polarization described in step 6 of 6.2.2, provides the amplitude and phase of the component's transfer matrix elements for two orthogonal input and output states of polarization. The wavelength dependence of this matrix can be used to calculate DGD according to the Jones Matrix Eigenanalysis, JME,

The transfer matrix, $T(\omega)$, for this purpose is assembled in the following manner. From the ω -dependent values of amplitude and phase for the two output states of polarization at the first input state of polarization, the complex matrix elements T_{11} and T_{21} are computed from the results of 6.2.4 according to:

$$T_{11}(\omega) = \frac{\sqrt{D_{11}(\omega)}}{\sqrt{D_{N11}(\omega)}} \text{Exp}(j\phi_{11}(\omega)) \text{ and } T_{21}(\omega) = \frac{\sqrt{D_{21}(\omega)}}{\sqrt{D_{N21}(\omega)}} \text{Exp}(j\phi_{21}(\omega)) \quad (\text{A.7})$$

Similarly from the results for the second input state of polarization, the complex matrix elements T_{12} and T_{22} are computed according to:

$$T_{12}(\omega) = \frac{\sqrt{D_{12}(\omega)}}{\sqrt{D_{N12}(\omega)}} \text{Exp}(j(\phi_{12}(\omega) + \pi)) \text{ and } T_{22}(\omega) = \frac{\sqrt{D_{22}(\omega)}}{\sqrt{D_{N22}(\omega)}} \text{Exp}(j\phi_{22}(\omega)) \quad (\text{A.8})$$

Note that the phase of T_{12} is reversed here with the offset of π , because the phase relationship from the reference arm of the interferometer at the two detectors is reversed for the second input state with respect to the first, when the setup of Fig. 2 is used.

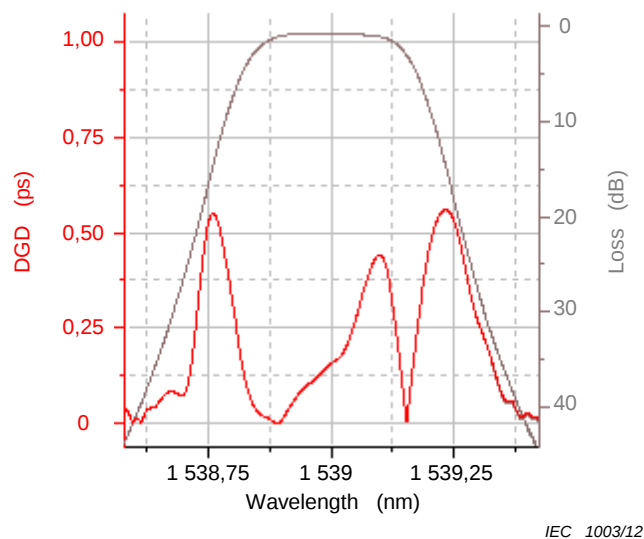
These elements are then combined to form the matrix $T(\omega)$:

$$\ddot{T} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \quad (\text{A.9})$$

Next the eigenvalues, ρ_1 and ρ_2 , are found for $T(\omega_{n+1})T^{-1}(\omega_n)$, where ω_n and ω_{n+1} are the optical frequency for adjacent points in the measured spectra. The DGD values, $\Delta\tau$, averaged respectively over the interval from ω_n to ω_{n+1} , are given for each interval by:

$$\Delta\tau = \frac{\left| \text{Arg}\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \right|}{\omega_{n+1} - \omega_n} \quad (\text{A.10})$$

where $\text{Arg}()$ denotes the argument function, such that $\text{Arg}(ae^{i\varphi}) = \varphi$. In this way, the DGD spectrum can be generated for the measured range. An example is shown in Figure A.2 for the same device as in Figure 10.



**Figure A.2 – DGD spectrum for a 50 GHz bandpass filter,
measured with 30 pm resolution BW**

A.5 Calculation of DGD from measurements made with the PPS method

The PPS method is described in 5.3 and 6.3. The following parameters are calculated using measured values in 6.3.3 and 6.3.4.

$$\begin{aligned}
 \bar{\alpha}_1 &= \frac{\Delta\Theta}{\Delta\omega} = \frac{\Delta\Theta}{2\pi \cdot \delta\lambda} \cdot \lambda_i \lambda_f \\
 \bar{\beta}_1 &= \frac{1}{4} \left(\frac{d\Phi_{11}}{d\omega} - \frac{d\Phi_{22}}{d\omega} - \frac{d\Phi_{21}}{d\omega} + \frac{d\Phi_{12}}{d\omega} \right) \\
 \bar{\gamma}_1 &= \frac{1}{4} \left(\frac{d\Phi_{11}}{d\omega} - \frac{d\Phi_{22}}{d\omega} + \frac{d\Phi_{21}}{d\omega} - \frac{d\Phi_{12}}{d\omega} \right) \\
 \Theta &= \frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\frac{|T_{11}|^2 - |T_{21}|^2}{|T_{11}|^2 + |T_{21}|^2} \right) \\
 \cos 2\Theta_0 &= \frac{|T_{11}|^2 - |T_{21}|^2}{|T_{11}|^2 + |T_{21}|^2}
 \end{aligned} \tag{A.11}$$

where

λ_i, λ_f are the initial and the final wavelength of $\delta\lambda$

$$\begin{aligned}
 |T_{kl}|^2 &= \frac{|T_{kl}|_{\text{mea}}^2}{|T_{11}|_{\text{cal}}^2} \quad \frac{d\Phi_{kl}}{d\omega} = \frac{d\Phi_{kl}}{d\omega}_{\text{mea}} - \frac{d\Phi_{11}}{d\omega}_{\text{cal}} \quad kl = 11 \text{ and } 12 \\
 |T_{mn}|^2 &= \frac{|T_{mn}|_{\text{mea}}^2}{|T_{22}|_{\text{cal}}^2} \quad \frac{d\Phi_{mn}}{d\omega} = \frac{d\Phi_{mn}}{d\omega}_{\text{mea}} - \frac{d\Phi_{22}}{d\omega}_{\text{cal}} \quad mn = 21 \text{ and } 22
 \end{aligned} \tag{A.12}$$

The DGD value for each wavelength is calculated using $\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1, \bar{\gamma}_1$ and Θ_0 as:

$$\text{DGD}(\lambda) = 2\sqrt{\bar{\alpha}_1^2 + \bar{\beta}_1^2 + \bar{\gamma}_1^2 + 2\bar{\beta}_1\bar{\gamma}_1\cos 2\Theta_0} \tag{A.13}$$

The calculation technique can result in a series DGD values versus wavelength. Figures A.3 and A.4 show examples of such characteristics.

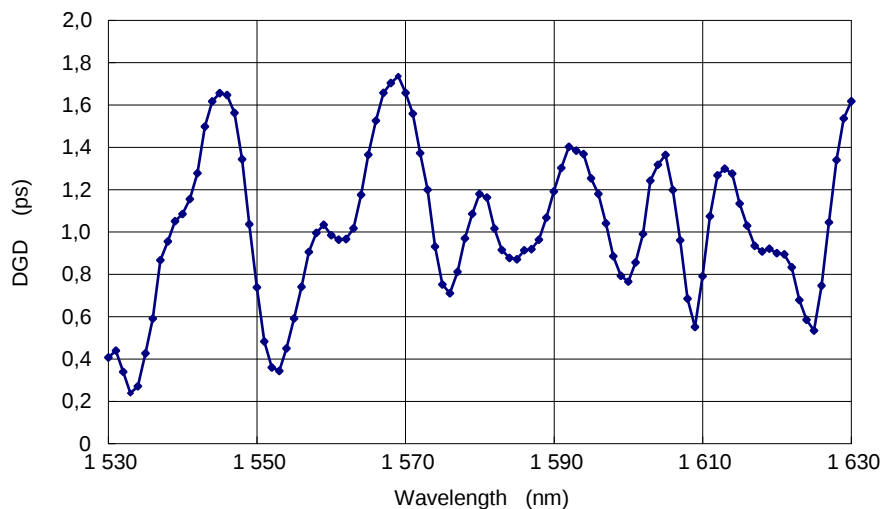
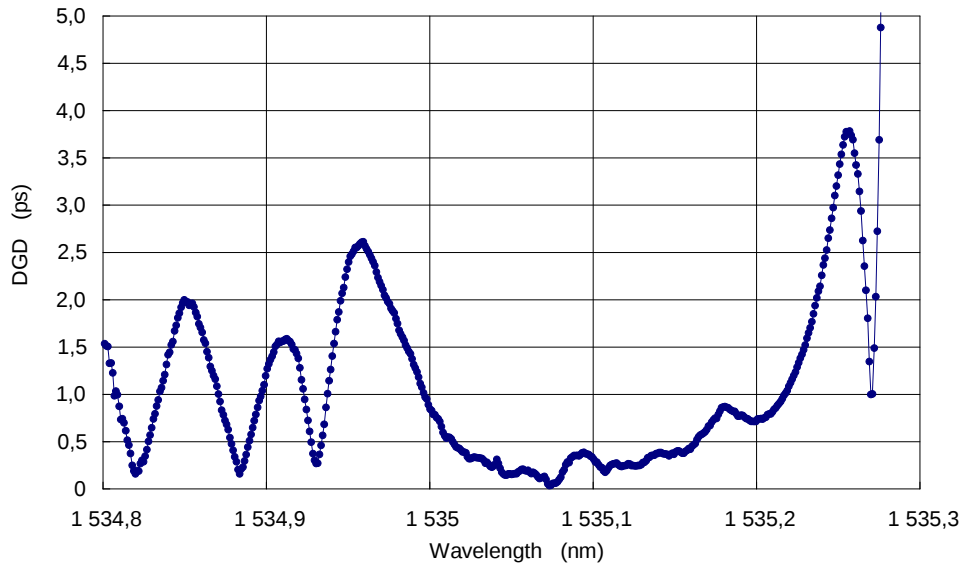


Figure A.3 – DGD versus wavelength for a random polarization mode coupling device (example)



IEC 1005/12

Figure A.4 – DGD versus wavelength for a fibre Bragg grating filter (example)

The derivation of DGD concerning this method is described here, and is similar to the Jones Matrix Eigenanalysis method. The optical transfer function matrix can be expressed as:

$$\begin{aligned}
 T(\omega) &= \begin{bmatrix} |T_{11}| \times \exp(-j \Phi_{11}) & |T_{12}| \times \exp(-j \Phi_{12}) \\ |T_{21}| \times \exp(-j \Phi_{21}) & |T_{22}| \times \exp(-j \Phi_{22}) \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \Theta \times \exp(-j \phi - j \psi) & -\sin \Theta \times \exp(-j \phi + j \psi) \\ \sin \Theta \times \exp(+j \phi - j \psi) & \cos \Theta \times \exp(+j \phi + j \psi) \end{bmatrix} \times \exp(-j \Phi)
 \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

where

- Θ the polarization angle
- ϕ the phase difference between T_{11} and T_{21}
- ψ the phase difference between T_{11} and T_{12}
- Φ the polarization-independent phase shift

The output of polarization vector, $E^{\text{out}}(\omega)$, is expressed using $T(\omega)$ as:

$$E^{\text{out}}(\omega) = T(\omega) \times E^{\text{in}}(\omega) \quad (\text{A.15})$$

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:

$$E^{\text{out}}(\omega) = E^{\text{out}}(\omega_0) + \left. \frac{dE^{\text{out}}}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} \delta\omega + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2E^{\text{out}}}{d\omega^2} \right|_{\omega=\omega_0} \delta\omega^2 \quad (\text{A.16})$$

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:

$$D(\omega) = \frac{dT(\omega)}{d\omega} \times T(\omega)^{-1} \quad (\text{A.17})$$

Therefore, the following expression is obtained by substituting A9 for A8.

$$\begin{aligned} E^{\text{out}}(\omega) &= \left\{ 1 + D\delta\omega + \frac{1}{2}D^2\delta\omega^2 + \frac{1}{2}\frac{dD}{d\omega}\delta\omega^2 \right\} \times E^{\text{out}}(\omega_0) \\ &\equiv \exp\left\{ D\delta\omega + \frac{1}{2}\frac{dD}{d\omega}\delta\omega^2 \right\} \times E^{\text{out}}(\omega_0) \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

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.

The following expression is obtained by diagonalising $D(\omega)$ with the unitary operator X .

$$\begin{aligned} X^{-1} \times E^{\text{out}}(\omega) &= X^{-1} \exp(D \times \delta\omega) X \times X^{-1} E^{\text{out}}(\omega_0) \\ &= \begin{bmatrix} \exp(-j\Gamma_+ \times \delta\omega) & 0 \\ 0 & \exp(-j\Gamma_- \times \delta\omega) \end{bmatrix} \times X^{-1} E^{\text{out}}(\omega_0) \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

Where $-j\Gamma_{+/-}$ are the eigenvalues of $D(\omega)$ and Γ_+ , Γ_- are respectively the maximum and minimum group delay.

That is, the difference between the imaginary parts of the eigenvalues of $D(\omega)$, $\Gamma_+ - \Gamma_-$, is the first order PMD called differential group delay.

Four independent parameters Θ , ϕ , ψ and Φ described in expression A.14 make the following expression using Taylor expansion.

$$\begin{aligned} \Theta &= \Theta_0 + \bar{\alpha}_1\delta\omega + \frac{1}{2}\bar{\alpha}_2\delta\omega^2 \\ \phi &= \phi_0 + \bar{\beta}_1\delta\omega + \frac{1}{2}\bar{\beta}_2\delta\omega^2 \\ \psi &= \psi_0 + \bar{\gamma}_1\delta\omega + \frac{1}{2}\bar{\gamma}_2\delta\omega^2 \\ \Phi &= \Phi_0 + \beta_1\delta\omega + \frac{1}{2}\beta_2\delta\omega^2 \end{aligned} \quad (\text{A.20})$$

Where

$$\delta\omega = \omega - \omega_c$$

$\Theta_0, \phi_0, \psi_0, \Phi_0$ the values of Θ, ϕ, ψ, Φ at $\omega - \omega_c = 0$

$\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1, \bar{\gamma}_1, \beta_1$ the first order coefficients of Taylor expansion of Θ, ϕ, ψ, Φ

$\bar{\alpha}_2, \bar{\beta}_2, \bar{\gamma}_2, \beta_2$ the second order coefficients of Taylor expansion of Θ, ϕ, ψ, Φ

The first order PMD operator $D(\omega)$ is expressed using expression A.20 as:

$$D(\omega) = -j\beta_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - j \begin{bmatrix} \bar{\beta}_1 + \bar{\gamma}_1 \cos 2\Theta & (-j\bar{\alpha}_1 + \bar{\gamma}_1 \sin 2\Theta) \times e^{-j2\phi} \\ (+j\bar{\alpha}_1 + \bar{\gamma}_1 \sin 2\Theta) \times e^{+j2\phi} & -\bar{\beta}_1 - \bar{\gamma}_1 \cos 2\Theta \end{bmatrix} \quad (\text{A.21})$$

Therefore, the eigenvalues of $D(\omega)$ are expressed as:

$$j\Gamma_{\pm} = -j\beta_1 \pm j\sqrt{\alpha_1^2 + \beta_1^2 + \gamma_1^2 + 2\bar{\beta}_1\bar{\gamma}_1\cos 2\Theta} \quad (\text{A.22})$$

Where β_1 is the polarisation-independent group delay.

The differential group delay, $\Delta\tau$, is given by the difference between the imaginary parts of the two eigenvalues as:

$$\Delta\tau = \Gamma_+ - \Gamma_- = 2\sqrt{\alpha_1^2 + \beta_1^2 + \gamma_1^2 + 2\bar{\beta}_1\bar{\gamma}_1\cos 2\Theta} \quad (\text{A.23})$$

The PMD value within the wavelength range is given by the average value of DGD over the measured wavelength range.

Bibliography

IEC 60793-1-42, *Optical fibres – Part 1-42: Measurement methods and test procedures – Chromatic dispersion*

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

IEC 61300-1, *Fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures – Part 1: General and guidance*

IEC 61300-3-1, *Fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures – Part 3-1: Examinations and measurements – Visual examination*

IEC 61300-3-32, *Fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures – Part 3-32: Examinations and measurements – Polarization mode dispersion measurement for passive optical components*

IEC/TR 62343-6-3, *Dynamic Modules – Round robin measurement results for group delay ripple of tunable dispersion compensators*

Frederick W. King, *Hilbert Transforms: Volume 1 (Encyclopedia of Mathematics and its Applications)*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	45
1 Domaine d'application	47
2 Références normatives	47
3 Termes et abréviations	47
4 Description générale	48
5 Appareillage	49
5.1 Méthode du déphasage par modulation	49
5.1.1 Généralités.....	49
5.1.2 Source de longueur d'onde variable (VWS).....	49
5.1.3 Filtre de suivi (facultatif)	50
5.1.4 Dispositif de couplage de référence RBD1, RBD2.....	50
5.1.5 Dispositif de contrôle de la longueur d'onde (facultatif).....	50
5.1.6 Dispositif en essai DUT	50
5.1.7 Détecteurs D1, D2	51
5.1.8 Générateur RF	51
5.1.9 Modulateur d'amplitude	51
5.1.10 Comparateur de phase	51
5.1.11 Liaisons temporaires TJ1, TJ2.....	52
5.1.12 Contrôleur de polarisation (facultatif)	52
5.1.13 Câble de liaison de référence	52
5.2 Méthode de l'interférométrie de longueurs d'onde balayées.....	52
5.2.1 Généralités.....	52
5.2.2 Source laser accordable TLS.....	53
5.2.3 Dispositif de contrôle de la longueur d'onde	53
5.2.4 Dispositifs de couplage de référence RBD1, RBD2, RBD3.....	53
5.2.5 Détecteurs D1, D2	54
5.2.6 Contrôleur de polarisation	54
5.2.7 Analyseur de polarisation	54
5.3 Méthode du déphasage par polarisation	54
5.3.1 Généralités.....	54
5.3.2 Source laser accordable TLS.....	55
5.3.3 Générateur RF	55
5.3.4 Modulateur d'amplitude	56
5.3.5 Contrôleur de polarisation	56
5.3.6 Séparateur de polarisation.....	56
5.3.7 Détecteurs D1, D2	56
5.3.8 Comparateur d'amplitude et de phase	57
6 Procédure de mesure	57
6.1 Méthode du déphasage par modulation	57
6.1.1 Principe de mesure.....	57
6.1.2 Fréquence de modulation RF.....	57
6.1.3 Séquence d'essais	59
6.1.4 Notification spéciale pour la mesure de la fluctuation du retard de groupe.....	60
6.1.5 Calcul du retard de groupe relatif	60
6.2 Méthode de l'interférométrie de longueurs d'onde balayées.....	60

6.2.1	Principe de mesure.....	60
6.2.2	Séquence d'essais	61
6.2.3	Notification spéciale pour la mesure de la fluctuation du retard de groupe	62
6.2.4	Calcul du retard de groupe	62
6.3	Méthode du déphasage par polarisation	63
6.3.1	Fréquence de modulation	63
6.3.2	Incrément de longueur d'onde	63
6.3.3	Balayage des longueurs d'onde et mesure de la dispersion chromatique	64
6.3.4	Étalonnage	64
6.3.5	Calcul du retard de groupe relatif et de la dispersion chromatique	64
6.4	Fenêtre de mesure (commune pour toutes les méthodes d'essai)	65
7	Analyse	67
7.1	Réduction de bruit de la mesure du retard de groupe	67
7.1.1	Moyenne	67
7.1.2	Filtrage spectrale.....	67
7.2	Variation de phase linéaire	67
7.3	Dispersion chromatique	67
7.3.1	Généralités.....	67
7.3.2	Calcul de différence finie	68
7.3.3	Ajustement de courbe	68
7.4	Fluctuation de phase	70
7.4.1	Généralités.....	70
7.4.2	Adaptation de pente	70
7.4.3	Estimation des fluctuations du retard de groupe	70
7.4.4	Calcul de la fluctuation de phase	70
8	Exemples de mesure	71
8.1	Filtre passe-bande à couche mince 50 GHz.....	71
8.2	Composants à filtres à guides d'ondes plans	71
8.3	Compensateur de dispersion accordable (réseau de Bragg de fibres).....	72
8.4	Dispositif de couplage de mode de polarisation aléatoire	73
9	Détails à spécifier	74
	Annexe A (informative) Calcul du retard de groupe différentiel.....	75
	Bibliographie.....	83
	Figure 1 – Appareil de la méthode de mesure du déphasage par modulation (MPS)	49
	Figure 2 – Appareil de la méthode de mesure de l'interférométrie de longueurs d'onde balayées	53
	Figure 3 – Appareil de la méthode de mesure du déphasage par polarisation (PPS)	55
	Figure 4 – Échantillonnage à la fréquence de modulation	59
	Figure 5 – Fenêtre de mesure centrée sur une longueur d'onde ITU avec une largeur définie	66
	Figure 6 – Fenêtre de mesure déterminée par la courbe de perte d'insertion à 3 dB	66
	Figure 7 – Dispersion chromatique calculée à partir d'un retard de groupe adapté sur une largeur de bande optique de 25 GHz centrée sur la fréquence ITU.....	69
	Figure 8 – Courbe polynomiale du 6 ^{ème} ordre adaptée sur les données de retard de groupe relatif sur une largeur de bande optique de 25 GHz centrée sur la fréquence ITU	69

Figure 9 – Estimation de l'amplitude de la fluctuation du retard de groupe et la période.....	70
Figure 10 – Spectre de retard de groupe et de perte pour filtre à multiplexage par répartition en longueur d'onde à forte densité à espacement entre voies de 50 GHz.....	71
Figure 11 – Spectres de retard de groupe et de perte mesurés pour un filtre à guide d'ondes plan	71
Figure 12 – Spectres de dispersion chromatique et de perte mesurés pour un filtre à guide d'ondes plan.....	72
Figure 13 – Ecart de retard de groupe mesuré d'un réseau de Bragg de fibres	72
Figure 14 – Ecart d'ondulation de phase mesuré d'un réseau de Bragg de fibres	73
Figure 15 – Retard de groupe mesuré pour un dispositif avec couplage de mode de polarisation aléatoire	73
Figure 16 – Retard de dispersion chromatique pour un dispositif avec couplage de mode de polarisation aléatoire	74
Figure A.1 – États de Mueller sur la sphère de Poincaré	75
Figure A.2 – Spectre du retard de groupe différentiel pour un filtre passe-bande de 50 GHz, mesuré avec une largeur de bande de résolution de 30 pm.....	78
Figure A.3 – Retard de groupe différentiel (DGD) en fonction de la longueur d'onde pour un dispositif à couplage de mode de polarisation aléatoire (exemple)	80
Figure A.4 – Retard de groupe différentiel (DGD) en fonction de la longueur d'onde pour un filtre à réseau de Bragg de fibres (exemple).....	80
Tableau 1 – Fréquence de modulation en fonction de la résolution de longueur d'onde pour la bande C	58
Tableau A.1 – Exemple d'ensemble de Mueller	76

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

DISPOSITIFS D'INTERCONNEXION ET COMPOSANTS PASSIFS À FIBRES OPTIQUES – PROCÉDURES FONDAMENTALES D'ESSAIS ET DE MESURES –

Partie 3-38: Examens et mesures – Retard de groupe, dispersion chromatique et fluctuation de phase

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 de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et 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. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de la CEI. La CEI n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à 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 de la CEI peuvent faire l'objet de droits de brevet. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61300-3-38 a été établie par le sous-comité 86B: Dispositifs d'interconnexion et composants passifs à fibres optiques, du comité d'études 86 de la CEI: Fibres optiques.

Cette première édition annule et remplace l'IEC/PAS 61300-3-38 parue en 2007. Cette édition constitue une révision technique.

Le texte de la présente Norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
86B/3394/FDIS	86B/3438/RVD

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

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

Une liste de toutes les parties de la série de normes CEI 61300, publiées sous le titre général, *Dispositifs d'interconnexion et composants passifs à fibres optiques – Procédures fondamentales d'essais et de mesures*, est disponible sur site web de la CEI.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de la CEI sous «<http://webstore.iec.ch>» dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

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

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

DISPOSITIFS D'INTERCONNEXION ET COMPOSANTS PASSIFS À FIBRES OPTIQUES – PROCÉDURES FONDAMENTALES D'ESSAIS ET DE MESURES –

Partie 3-38: Examens et mesures – Retard de groupe, dispersion chromatique et fluctuation de phase

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61300 décrit les méthodes de mesure nécessaires pour caractériser les propriétés du retard de groupe de dispositifs passifs et de modules dynamiques. A partir de ces mesures, on peut déduire d'autres paramètres tels que la fluctuation du retard de groupe, l'écart de phase linéaire, la dispersion chromatique, la pente de dispersion et la fluctuation de phase. En outre, quand ces mesures sont faites avec une polarisation résolue, le retard de groupe différentiel peut également être déterminé comme une alternative à une mesure distincte avec la méthode dédiée de la CEI 61300-3-32.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60050-731, *Vocabulaire Electrotechnique International – Chapitre 731: Télécommunications par fibres optiques*

CEI 61300-3-29, *Dispositifs d'interconnexion et composants passifs à fibres optiques – Méthodes fondamentales d'essais et de mesures – Partie 3-29: Examens et mesures – Techniques de mesure pour caractériser l'amplitude de la fonction de transfert spectrale des composants DWDM*

3 Termes et abréviations

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans la CEI 60050-731 et la CEI 61300-3-29 s'appliquent, avec les suivants.

BW	Bande passante: largeur spectrale d'un signal ou d'un filtre.
CD	Dispersion chromatique (en ps/nm): variation de retard de groupe sur la longueur d'ondes: $CD = d(GD)/d\lambda$
D	Détecteur
DGD	Retard de groupe différentiel (en ps): différence de temps de propagation entre deux modes de polarisation orthogonale
DUT	(Device Under Test) Dispositif en essai
DWDM	Multiplexage par répartition en longueur d'onde dense
δ	Taille des pas de la source de longueur d'onde variable pendant les mesures sur les longueurs d'onde explorées
f_{RF}	Fréquence de modulation
GD	Retard de groupe (en ps): temps nécessaire pour qu'un signal traverse un dispositif.

GDR	Fluctuation du retard de groupe (en ps): amplitude de la fluctuation du retard de groupe
LN	LiNbO ₃
LPV	Variation linéaire de phase (en degrés)
λ_c	Longueur d'onde centrale du canal ou longueur d'onde de fonctionnement nominale pour un composant
MPS	Modulation de phase par déplacement
PBS	Séparateur de faisceau de polarisation
PMD	Dispersion de mode de polarisation (en ps): valeur moyenne du retard de groupe différentiel sur la longueur d'onde
PPS	Polarisation de phase par déplacement
PSP	État de polarisation principal
Φ	Retard de phase
RBD	Coupleur de référence
SOP	État de polarisation
SSE	Source à émission spontanée
SWI	Interférométrie des longueurs d'onde explorées
$\Delta\theta$	Fluctuation de phase
TDC	Compensateur de dispersion accordable
TJ	Liaison temporaire
TLS	Source laser accordable
VWS	Source de longueur d'onde variable

4 Description générale

Le présent document couvre les mesures en transmission des propriétés des retards de groupe de dispositifs passifs et de modules dynamiques. Pour interpréter les propriétés des retards de groupe, il est essentiel de disposer de la mesure spectrale de l'amplitude. Pour cette raison, les mesures de pertes sont également couvertes dans la mesure où elles sont nécessaires pour réaliser des mesures de dispersion correctes.

Les méthodes décrites dans cette procédure sont destinées à être appliquées à n'importe quelle bande de longueur d'onde (C, L, O, etc.) bien que des exemples puissent être représentés uniquement dans la bande C à des fins d'illustration.

Le présent document est séparé en deux sections, une portant sur les méthodes de mesure, et une autre sur l'analyse des données de mesure. Les méthodes de mesure couvertes par ce document sont la méthode de modulation de phase par déplacement la méthode de l'interférométrie de longueurs d'onde balayées et la méthode de polarisation de phase par déplacement. La méthode de modulation de phase par déplacement est considérée comme la méthode de référence. Les méthodes sont choisies pour leur capacité à fournir des résultats en résolution spectrale, qui sont souvent nécessaires pour les composants passifs et particulièrement pour les dispositifs à longueurs d'onde sélectives.

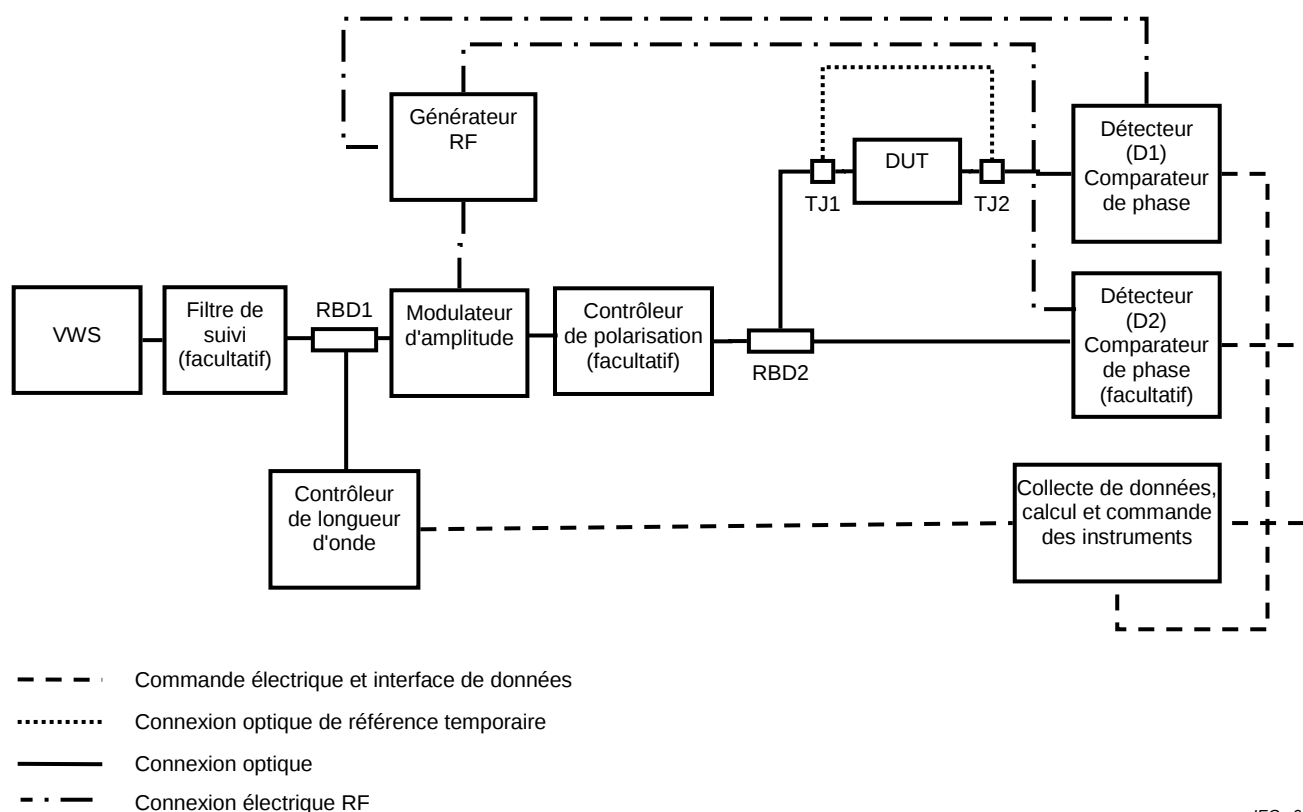
Le paramètre de mesure approprié pour évaluer la fluctuation du retard de groupe (GDR), et la méthode pour estimer la fluctuation de phase à partir du résultat de mesure de la GDR sont présentés en 7.4. La fluctuation de phase est une mesure importante de l'influence du retard de groupe d'un circuit optique sur la qualité d'une transmission, puisque de nombreux compensateurs de dispersion accordables utilisent l'effet des interférences lorsque l'effet des fluctuations est important.

5 Appareillage

5.1 Méthode du déphasage par modulation

5.1.1 Généralités

Le montage de mesure pour la caractérisation des propriétés du retard de groupe (GD) des composants optiques est représenté à la Figure 1. Une explication détaillée des différents composants de ce système et de leurs fonctions est donnée de 5.1.2 à 5.1.13.



IEC 986/12

Figure 1 – Appareil de la méthode de mesure du déphasage par modulation (MPS)

5.1.2 Source de longueur d'onde variable (VWS)

La source de longueur d'onde variable (VWS) est une source de lumière polarisée qui peut sélectionner une longueur d'onde de sortie spécifique et peut être accordée sur une gamme de longueurs d'onde spécifiées. La stabilité de la puissance à n'importe laquelle des longueurs d'onde de fonctionnement doit être suffisante pour ne pas provoquer d'erreurs importantes dans les comparateurs de phase. La répétabilité et la précision relative de la longueur d'onde, déterminée à la fois par le VWS et par le dispositif de contrôle de la longueur d'onde, doivent être précises à 3 pm pour chaque point dans la gamme de mesure et il convient que la précision absolue sur la longueur d'onde satisfasse aux spécifications des longueurs d'onde du dispositif en essai. La largeur de raie de la source doit être inférieure à 100 MHz. La gamme d'accord du VWS doit couvrir toute la région spectrale du dispositif et la source doit également être exempte de saut de mode sur la gamme d'accord. La puissance de sortie du VWS doit être suffisante pour délivrer un signal suffisant pour garantir une bonne comparaison de la phase.

Il convient d'ajuster l'incrément minimum de la longueur d'onde de la source de longueur d'onde variable sur un dixième de la période attendue de la fluctuation du retard de groupe du dispositif en essai.

5.1.3 Filtre de suivi (facultatif)

Le filtre de suivi peut être utile pour n'importe quelle mesure de DUT si la gamme dynamique de la source de longueur d'onde variable et le détecteur ne permettent pas de mesurer une gamme dynamique d'au moins 40 dB en raison de la forme du DUT et des émissions de source spontanées à large bande de la source de longueur d'onde variable. Le filtre doit suivre la source de longueur d'onde variable de façon à fournir la suppression maximale des émissions de source spontanées et la puissance transmise maximale lorsque la source de longueur d'onde variable est balayée dans la région de mesure. La forme spectrale du filtre doit présenter une atténuation de bande suffisante pour offrir une gamme dynamique de 40 à 50 dB au niveau du détecteur de transmission.

5.1.4 Dispositif de couplage de référence RBD1, RBD2

La configuration du dispositif de couplage de référence est 1×2 ou 2×2 . Si sa configuration est 2×2 , un port du dispositif de couplage de référence doit être raccordé pour avoir un affaiblissement de réflexion inférieur à 50 dB. Le rapport de division du dispositif de couplage de référence doit avoir une longueur d'onde stable. Il doit aussi ne pas dépendre de la polarisation. La sensibilité à la polarisation de l'affaiblissement de transmission doit être inférieure à un dixième de la dépendance à la longueur d'onde de l'affaiblissement du dispositif ou inférieure à 0,1 dB. La directivité supérieure doit être supérieure d'au moins 10 dB par rapport à celle de l'affaiblissement de réflexion maximal. Le rapport de division doit être suffisant pour fournir la gamme dynamique pour la mesure de la fonction de transfert et la puissance nécessaire pour que le dispositif de contrôle de la longueur d'onde fonctionne correctement.

5.1.5 Dispositif de contrôle de la longueur d'onde (facultatif)

Dans cette procédure d'essai, la précision en longueur d'onde de la source doit être contrôlée de près. Si la précision de réglage de la source de longueur d'onde variable n'est pas suffisante pour effectuer des mesures, un dispositif de contrôle de la longueur d'onde est nécessaire. Pour cette méthode de mesure, il est nécessaire de mesurer la crête spectrale de tout signal d'entrée dans la largeur de bande du dispositif à une précision de 3 pm. Les dispositifs de contrôle de la longueur d'onde acceptables incluent un appareil de contrôle de la longueur d'onde optique ou une cellule d'absorption de gaz (telle qu'une cellule d'acétylène). Si une cellule d'absorption de gaz est utilisée, la précision en longueur d'onde de la source de longueur d'onde variable doit être suffisante pour résoudre les lignes d'absorption. La source de longueur d'onde variable doit être suffisamment linéaire entre les lignes d'absorption.

La présente spécification inclut la répétabilité de la longueur d'onde de la source de longueur d'onde variable et du dispositif de contrôle. Il convient de comprendre que si le dispositif d'essai a des fluctuations de 0,1 ps avec une période de 30 pm, une variation aléatoire de la longueur d'onde de 3 pm par rapport au balayage de référence au balayage du dispositif peut alors entraîner jusqu'à 0,03 ps de bruit du retard de groupe.

5.1.6 Dispositif en essai DUT

Dans le cadre du présent document, les ports d'essai doivent être à un seul trajet "entrée-sortie". La méthode décrite peut être extrapolée afin d'obtenir un système de mesure unique capable de manipuler un dispositif $m \times n$. Le dispositif doit être raccordé sur des fibres amorces ou à l'aide de connecteurs. Puisque ce montage de mesure dépend fortement des réflexions et qu'il sert à détecter des réflexions dans le DUT, il est important que le système de mesure n'introduise pas de réflexions.

Dans de nombreux cas, les caractéristiques des composants de multiplexage par répartition en longueur d'onde à forte densité dépendent de la température. Cette procédure de mesure suppose que tous les dispositifs de ce type soient maintenus à température constante pendant toute la procédure. La précision absolue de la mesure peut être limitée par la précision d'un dispositif de chauffage ou de refroidissement utilisé afin de maintenir une

température constante. Par exemple, si un dispositif est connu pour avoir une dépendance à la température de $0,01 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, et si la température au cours de la procédure est maintenue à une température réglée à $\pm 1^{\circ}\text{C}$, il est établi que tous les résultats spectraux obtenus ont une incertitude de $0,02 \text{ nm}$ due à la température.

5.1.7 Détecteurs D1, D2

Les détecteurs comprennent un détecteur optique, les éléments électroniques associés et un moyen de connexion à une fibre optique. L'utilisation d'un détecteur (D2) est facultative, mais permet de corriger l'instabilité de retard de groupe du montage des instruments entre le modulateur et le DUT entre l'étape 3 et l'étape 4 de 6.1.3. La connexion optique peut être un réceptacle pour connecteur optique, une fibre amorce ou un adaptateur de fibre nue. La réflexion provenant des détecteurs D1 et D2 doit être minimisée. Les options préférentielles consisteraient à utiliser un connecteur APC. Il convient de noter que l'utilisation d'un connecteur APC contribuerait approximativement à $0,03 \text{ dB}$ de pertes dépendant de la polarisation pour les mesures non raccordées.

La gamme dynamique et la sensibilité des détecteurs doivent être suffisantes pour la gamme de mesure requise, en considérant le niveau de puissance fourni par la source modulée. La linéarité des détecteurs doit être suffisante pour produire une représentation précise du signal modulé. Le détecteur doit transférer la phase de la modulation optique à la phase de sortie RF avec une bonne stabilité et une faible dépendance au niveau du signal optique.

Si, pendant la séquence des mesures, un détecteur doit être déconnecté puis reconnecté, l'efficacité du couplage doit être maintenue pour les deux mesures au moins à la précision du connecteur accouplé.

5.1.8 Générateur RF

Le générateur RF délivre un signal électrique qui est utilisé pour exciter le modulateur d'intensité. De plus, le signal est délivré au comparateur de phase dans les détecteurs D1 et D2 comme signal de référence. Le générateur RF produit une forme d'onde avec une seule composante de Fourier dominante, par exemple, une modulation d'onde sinusoïdale. Typiquement, un signal sinusoïdal avec une fréquence dans la gamme de 100 MHz à 3 GHz est utilisé. Le générateur RF doit présenter une stabilité et une précision sur la fréquence suffisante pour la précision de mesure requise, en considérant que la fréquence fournit la base de temps pour la mesure du retard de groupe.

5.1.9 Modulateur d'amplitude

Le modulateur d'amplitude utilise le signal modulé provenant du générateur RF pour induire la modulation d'amplitude équivalente sur un signal optique d'onde continue. Le modulateur convertit le signal modulé provenant du générateur RF en signal optique modulé. Le modulateur doit avoir une linéarité suffisante pour produire une bonne modulation sinusoïdale. Il convient que l'amplitude de modulation soit adaptée à la plage dynamique du système de détection.

5.1.10 Comparateur de phase

Le comparateur de phase est intégré aux détecteurs D1 et D2, qui comparent la phase du signal optique modulé et du signal de référence RF. Typiquement, un analyseur de réseau ou un amplificateur à verrouillage est utilisé comme comparateur de phase. Une méthode connue sous le nom de détection sensible à la phase est utilisée pour isoler la composante du signal à une fréquence et une phase de référence spécifiques. Les signaux de bruit à des fréquences autres que la fréquence de référence sont rejetés et n'affectent pas la mesure de phase. Le niveau de signal RF ne doit pas affecter la mesure de la phase.

5.1.11 Liaisons temporaires TJ1, TJ2

Les liaisons temporaires sont spécifiées pour connecter le signal d'essai d'entrée du DUT à la sortie du dispositif vers le détecteur de transmission (D1).

Des exemples typiques de liaisons temporaires sont des connecteurs ou des lames. Toutefois, d'autres méthodes utilisant, par exemple des plateaux à vide ou des micromanipulateurs, peuvent être utilisées. En raison de la sensibilité élevée aux rétro-réflexions, il est nécessaire de garantir que la rétro-réflexion de ces liaisons est inférieure à -50 dB.

5.1.12 Contrôleur de polarisation (facultatif)

Le signal laser modulé peut être envoyé à un contrôleur de polarisation, dans lequel la polarisation peut être ajustée aux 4 états de Mueller situés à la surface de la sphère de Poincaré. Trois états sont sur l'équateur de la sphère Poincaré espacés de 90 degrés les uns des autres pour constituer les états de polarisation linéaire 0°, 45° et 90°. Le quatrième état est le pôle de la sphère de Poincaré pour la polarisation circulaire. Si le DUT présente une dispersion de mode de polarisation, le calcul de la moyenne des résultats à partir des états de polarisation orthogonaux permet de déterminer la moyenne du retard de groupe sur tous les états de polarisation d'entrée. Le retard de groupe différentiel (DGD) peut être calculé à partir d'un ensemble de mesures de retard de groupe sur les 4 états de Mueller. Le contrôleur de polarisation doit pouvoir fournir une stabilité de polarisation satisfaisante sur la gamme des longueurs d'onde de la mesure.

5.1.13 Câble de liaison de référence

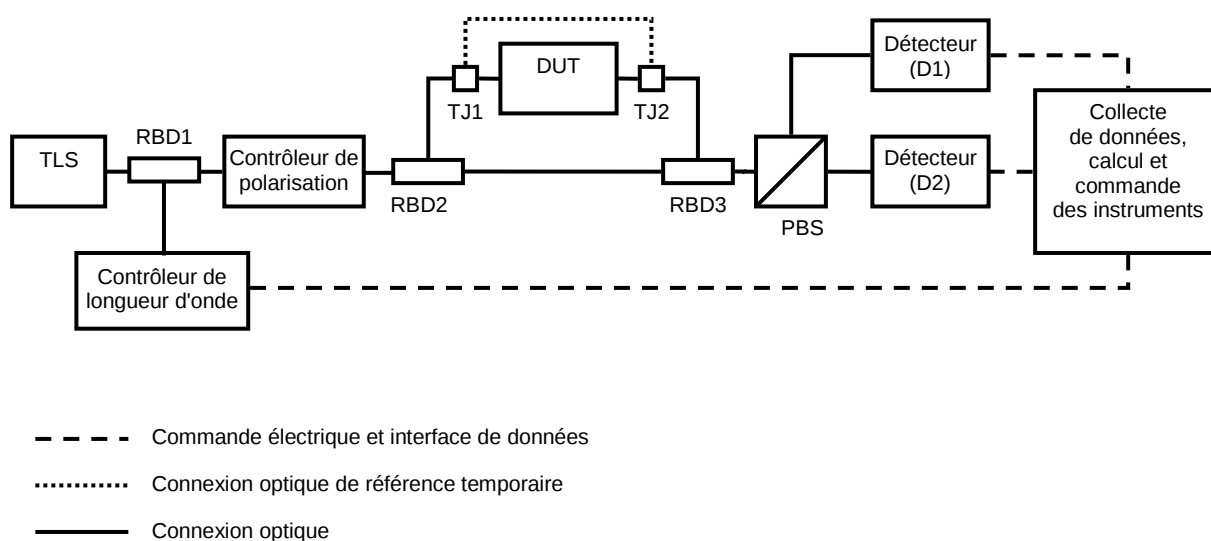
Le câble de liaison de référence est une fibre unimodale. La connexion optique peut être un connecteur optique, une fibre amorce ou une fibre nue. Le câble de liaison de référence doit avoir la même connexion optique que le DUT.

5.2 Méthode de l'interférométrie de longueurs d'onde balayées

5.2.1 Généralités

Le montage de mesure de cette méthode est présenté à la Figure 2. Une explication détaillée des différents composants de ce système et de leurs fonctions est donnée de 5.2.2 à 5.2.7. Le montage représenté illustre une mesure de transmission d'un DUT avec deux ports optiques.

La mesure du retard de groupe est généralement utile pour déterminer sa dépendance par rapport à la longueur d'onde et à la polarisation. Toutefois, le retard de groupe de la fibre optique et d'autres composants des réseaux de fibre optique dépend également des paramètres extérieurs tels que la température, la pression, les contraintes mécaniques et le bruit. Par conséquent, il convient que le montage pour mesurer le retard de groupe soit stable malgré les mouvements de la fibre et les variations externes pendant la mesure. Puisque la méthode de l'interférométrie de longueurs d'onde balayées repose sur le suivi de la phase optique, qui est très sensible au retard de groupe et aux variations de retard de groupe dans une fibre, une telle propriété est particulièrement importante pour cette méthode.



IEC 987/12

Figure 2 – Appareil de la méthode de mesure de l'interférométrie de longueurs d'onde balayées

5.2.2 Source laser accordable TLS

La méthode de l'interférométrie de longueurs d'onde balayées utilise des interférences cohérentes, et une source laser accordable est donc nécessaire pour délivrer un signal de longueur d'onde variable. La source laser accordable doit donc être accordable sur la gamme de longueurs d'onde requise. En raison des exigences typiques sur la cohérence et la résolution des longueurs d'onde, la largeur des raies doit être inférieure à 1 MHz. Une longueur de dispositif typique d'environ 10 m, cordons de connexion compris, donnera une période d'interférogramme d'environ 20 MHz. La caractérisation précise de ceci nécessite une résolution sensiblement plus petite. Typiquement, des mesures rapprochées sont nécessaires (en fonction de la longueur et de la gamme de retards de groupe du DUT comme cela est étudié en 6.2.1), et il est donc fortement recommandé d'effectuer les mesures pendant le balayage continu des longueurs d'onde par la source. Par conséquent, le montage doit offrir une commande et un contrôle spécifiés de la longueur d'onde pendant le balayage.

5.2.3 Dispositif de contrôle de la longueur d'onde

Si la source laser accordable n'offre pas une précision de longueur d'onde appropriée, elle doit être assurée par le dispositif de contrôle de longueur d'onde. Le dispositif de contrôle améliore la précision absolue de la longueur d'onde et la précision relative de la longueur d'onde pour chaque point de mesure pendant le balayage de longueur d'onde.

5.2.4 Dispositifs de couplage de référence RBD1, RBD2, RBD3

Les dispositifs de couplage, RBD2 et RBD3, sont utilisés pour établir l'interféromètre en divisant le chemin optique de sorte qu'une partie de la lumière traverse le DUT et l'autre partie suit un chemin de référence. La lumière des deux chemins est alors recombinaée de sorte qu'elle interfère au niveau des détecteurs. Ces coupleurs auront typiquement un rapport de couplage de 50:50. D'autres dispositifs de couplage peuvent être utilisés pour prélever la lumière à contrôler, comme pour le dispositif de contrôle de longueur d'onde. Il convient de sélectionner ces dispositifs pour fournir un signal approprié pour la fonction de contrôle. La configuration des dispositifs de couplage est 1×2 ou 2×2 . Les ports inutilisés du dispositif de couplage de référence doivent être raccordés pour donner une rétro-réflexion inférieure à -50 dB.

5.2.5 Détecteurs D1, D2

Les détecteurs sont utilisés pour suivre la puissance optique par rapport à la longueur d'onde. Comme cela est décrit ci-dessous, la configuration recommandée produit deux telles traces pour la lumière à deux états de polarisation orthogonaux. Les traces donneront généralement des oscillations de la puissance avec une période de longueur d'onde très courte comme cela est expliqué en 5.2.1, de sorte qu'une forte densité des mesures en fonction de la longueur d'onde soit nécessaire. Par conséquent, un système de détection d'acquisition de données à grande vitesse est recommandé. Dans l'étude ci-dessous, on suppose que le signal de sortie correspond à la puissance optique. Puisque des variations relatives de la puissance seront évaluées, il convient que les détecteurs présentent une bonne linéarité et il convient de prendre les précautions nécessaires pour éviter d'approcher la saturation.

5.2.6 Contrôleur de polarisation

Pour obtenir le signal d'interférence suffisant à partir de l'interféromètre, on doit s'assurer que la lumière provenant des deux chemins est combinée avec la même polarisation, puisque des signaux de polarisation orthogonale ne produiront pas d'interférence. Puisqu'on ne connaît généralement pas l'état de polarisation de la lumière à la sortie du DUT, il est nécessaire de contrôler la polarisation. Le contrôleur de polarisation et l'analyseur de polarisation de 5.2.6 sont combinés pour satisfaire à cette fonction, comme cela est décrit à l'Article 5. Généralement, le contrôleur de polarisation est utilisé pour établir la polarisation au niveau de l'entrée du DUT et pour "équilibrer" la puissance au niveau des deux détecteurs du chemin de référence de l'interféromètre. Le contrôleur de polarisation doit pouvoir fournir une stabilité de polarisation satisfaisante sur la gamme des longueurs d'onde de la mesure, par exemple en utilisant des plaques de retard d'ordre zéro. La combinaison de l'analyseur et du contrôleur de polarisation permet également de calculer le retard de groupe différentiel à partir d'un ensemble de mesures du retard de groupe à différentes conditions de polarisation.

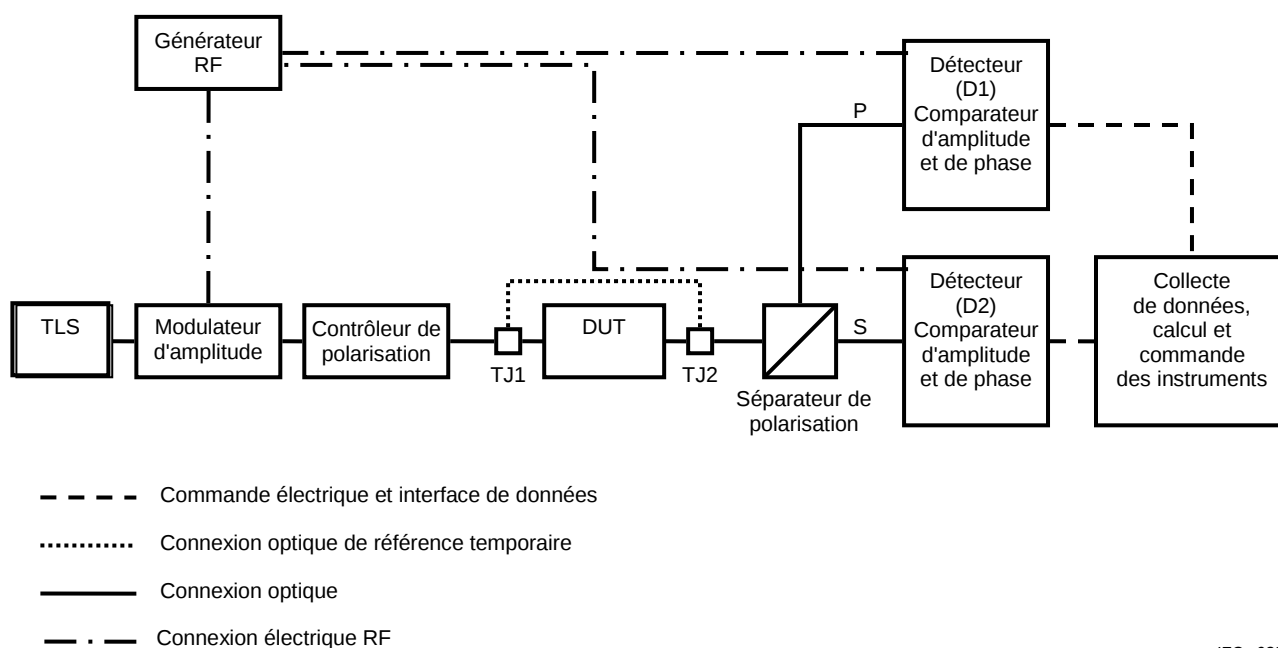
5.2.7 Analyseur de polarisation

L'analyseur de polarisation est la deuxième partie de la configuration pour garantir des conditions d'interférence favorables, basée sur la polarisation. Une réalisation pratique consiste à utiliser le séparateur de faisceau par polarisation (PBS) en association avec les deux détecteurs. Quand le contrôleur de polarisation de 4.2.5 assure qu'une puissance similaire du bras de référence est présente sur les deux détecteurs, alors la lumière provenant du DUT sera également divisée en deux composantes respectives avec la même polarisation au niveau du détecteur que la lumière de référence. Ceci garantit que le signal d'interférence est bon.

5.3 Méthode du déphasage par polarisation

5.3.1 Généralités

La Figure 3 illustre une représentation schématique de la méthode du déphasage par polarisation (PPS). Une explication détaillée des différents composants de ce système et de leurs fonctions est donnée de 5.3.2 à 5.3.8.



IEC 988/12

Figure 3 – Appareil de la méthode de mesure du déphasage par polarisation (PPS)

5.3.2 Source laser accordable TLS

Une source de laser accordable sert de source de lumière. La plage de réglage de la longueur d'onde du laser doit être suffisante pour couvrir la plage de longueurs d'onde à mesurer. Pour obtenir un bon rapport signal/bruit et une bonne résolution de longueur d'onde du résultat de la mesure, il convient que le laser soit de puissance suffisante pour le rapport signal/bruit (SNR, *signal-to-noise ratio*) requis et il convient que la largeur spectrale des raies soit assez étroite pour la résolution de longueur d'onde requise. On utilise généralement des lasers à cavité externe stabilisés en longueur d'onde et contrôlés en température et en courant entièrement autonomes. La sortie de la source laser accordable est connectée à un modulateur d'intensité optique par une fibre à maintien de polarisation.

L'incrément de longueur d'onde de la source de longueur d'onde variable doit être optimal sur la période de la fluctuation du retard de groupe du DUT.

5.3.3 Générateur RF

Le générateur RF délivre un signal modulé au modulateur d'intensité optique. Une partie du signal modulé 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 modulé sinusoïdal dont la plage de fréquences est normalement de 50 MHz à 3 GHz. Pour sélectionner la fréquence de modulation, on doit tenir compte de l'influence indésirable des bandes latérales de la modulation et de la résolution de la mesure de la dispersion chromatique.

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 optique. La résolution effective de la longueur d'onde $\Delta\lambda$ (nm) est limitée par les bandes latérales et elle est généralement donnée par:

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

où

λ est la longueur d'onde (nm)

f est la fréquence de modulation (GHz), et

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

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

$$\Delta GD = \frac{\Delta\phi \times 10^3}{2\pi f} \quad (2)$$

où

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

f est la fréquence de modulation (GHz)

5.3.4 Modulateur d'amplitude

Le modulateur d'intensité optique module l'intensité de la lumière de la source laser accordable synchronisée sur le signal modulé provenant de la source de signal RF. Les performances optiques telles que l'affaiblissement d'insertion, le rapport d'extinction marche-arrêt et le rapport d'extinction de polarisation doivent satisfaire à la valeur requise sur la gamme de longueurs d'onde à mesurer. Pour atteindre ces performances, on utilise généralement un modulateur LiNbO_3 (LN). Une fibre de maintien de polarisation est utilisée comme une fibre d'entrée afin de la connecter à une source de laser accordable. Une tension d'excitation est généralement déterminée à partir de la tension de demi-longueur d'onde ($V\pi$) du modulateur LN, et la puissance de sortie de la source de signal RF est ajustée de sorte que le degré de modulation d'intensité optique soit approximativement 20 %.

5.3.5 Contrôleur de polarisation

Le contrôleur de polarisation est utilisé pour délivrer une lumière à 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 par rotation des deux lames à retard. La résolution à angle réglable doit être inférieure à $\pm 0,1$ degré et le rapport d'extinction de polarisation doit être supérieur à 20 dB sur la gamme de longueur d'onde à mesurer.

5.3.6 Séparateur de polarisation

Le séparateur de polarisation est placé après le DUT. La lumière de sortie est séparée en deux signaux de polarisation orthogonale, des lumières polarisées P et S. Chaque signal est délivré aux détecteurs optiques. Le séparateur de polarisation est constitué d'un cristal non-isotrope, par exemple un prisme en calcite, et il présente un rapport d'extinction de polarisation élevé supérieur à 20 dB. L'affaiblissement d'insertion doit être inférieur à 1 dB. Les performances optiques telles que le rapport d'extinction de polarisation et l'affaiblissement d'insertion du séparateur de polarisation doivent satisfaire à la valeur requise sur la gamme de longueurs d'onde à mesurer.

5.3.7 Détecteurs D1, D2

Les récepteurs optiques convertissent la lumière modulée provenant du dispositif en essai en signal électrique. On utilise généralement une photodiode PIN, présentant une bonne linéarité et une faible densité de bruit d'environ $10 \text{ pA}/(\text{Hz})^{1/2}$. La photodiode PIN doit présenter une caractéristique de réponse suffisante pour répondre à la fréquence de modulation de la source de signal RF. De plus, pour garantir un rapport signal/bruit élevé, un amplificateur à large bande et faible bruit doit être utilisé après les détecteurs optiques.

5.3.8 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 onde polarisée avec le signal de référence provenant de la source de signal RF. Le taux de retard de groupe (ps) est calculé à partir de la phase en utilisant l'équation suivante:

$$\tau = \frac{\phi \times 10^3}{2\pi f} \quad (3)$$

où

ϕ est la phase (radians) et

f est la fréquence de modulation (GHz)

Le signal de référence, qui est une partie du signal modulé 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 modulé. La précision de la phase totale, en incluant la stabilité de la fréquence de la source de signal RF doit être inférieure à $\pm 0,3$ degré ou suffisante pour garantir une précision de mesure adéquate.

6 Procédure de mesure

6.1 Méthode du déphasage par modulation

6.1.1 Principe de mesure

Le retard de groupe, τ_g , est défini comme la dérivée de la phase optique Φ_{opt} en fonction de sa fréquence angulaire $\omega_{\text{opt}}=2\pi f_{\text{opt}}$ conformément à l'équation:

$$\tau_g(\omega_0) = \left. \frac{d\Phi_{\text{opt}}(\omega_{\text{opt}})}{d\omega_{\text{opt}}} \right|_{\omega_0} = \left. \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi_{\text{opt}}(f_{\text{opt}})}{df_{\text{opt}}} \right|_{\nu_0} \quad (4)$$

Dans la méthode du déphasage par modulation, une source de longueur d'onde accordable est modulée en amplitude avec une forme d'onde sinusoïdale à un rapport RF/hyperfréquences f_{RF} , typiquement dans une gamme de 100 MHz à 3 GHz. Le signal optique modulé est transmis au dispositif en essai et détecté dans le récepteur. Les phases du signal RF par rapport à celles de la source de modulation de référence $\Phi_{\text{RF1}}, \Phi_{\text{RF2}}, \dots, \Phi_{\text{RFn}}$ sont enregistrées aux longueurs d'onde $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ correspondant aux fréquences optiques $f_{\text{opt1}}, f_{\text{opt2}}, \dots, f_{\text{optn}}$. Ces mesures sont utilisées pour déterminer le retard de groupe relatif, c'est-à-dire la variation de retard de groupe sur un intervalle de longueur d'onde. A partir des mesures des phases RF à deux longueurs d'onde adjacentes λ_i à λ_j , la variation de retard de groupe, $\Delta\tau_g(\lambda_i, \lambda_j)$, peut être obtenue sous la forme

$$\Delta\tau_g(\lambda_i, \lambda_j) = \frac{\varphi_{\text{RF}}(\lambda_j) - \varphi_{\text{RF}}(\lambda_i)}{2\pi f_{\text{RF}}} \quad (5)$$

6.1.2 Fréquence de modulation RF

La fréquence de modulation RF doit être choisie avec soin. Un compromis doit être considéré entre le bruit du retard de groupe sur la trace de la mesure et la résolution spectrale de la courbe. Le Tableau 1 indique les fréquences de modulation RF maximales recommandées pour une certaine résolution spectrale requise.

Il convient de prêter une attention particulière à la relation entre l'espacement des échantillons de longueur d'onde et la fréquence de modulation. En particulier, pour les

dispositifs présentant une dispersion élevée, la différence du retard de groupe par rapport à l'espacement des échantillons de longueur d'onde limite la fréquence de modulation maximale qui peut être utilisée sans risquer de déphasages de plus de 180 degrés, qui entraînent des résultats ambigus dus aux erreurs d'enroulement de phase. Il convient que la fréquence de modulation satisfasse:

$$f_{\text{RF}} < \frac{1}{\Delta \tau_{\text{max}}} \quad (6)$$

où $\Delta \tau_{\text{max}}$ est la différence maximale de retard de groupe par rapport à l'espacement d'échantillonnage.

Dans le cas où la résolution spectrale due à la modulation est équivalente à l'échantillon de longueur d'onde, les mesures acquises à des longueurs d'onde successives peuvent être moyennées pour synthétiser (c'est-à-dire pour donner un résultat similaire à l'utilisation de) une valeur plus élevée de f_{RF} , parce que les contributions de phase de la bande latérale supérieure d'une acquisition sont annulées par les contributions de phase égales mais opposées de la bande latérale inférieure d'une acquisition adjacente.

La Figure 4 illustre un exemple de trois points d'acquisition où l'espacement des échantillons de longueur d'onde est égal à la fréquence de modulation. Chaque ellipse décrit le spectre optique à chaque longueur d'onde instantanée. Comme on l'a décrit ci-dessus, les trois longueurs d'onde instantanées successives peuvent être moyennées pour donner une seule longueur d'onde instantanée équivalente de fréquence de modulation efficace égale à $3f_{\text{RF}}$ et une longueur d'onde efficace centrale égale à λ_2 (c'est-à-dire la moyenne de $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$).

Tableau 1 – Fréquence de modulation en fonction de la résolution de longueur d'onde pour la bande C

Fréquence de modulation (GHz)	Résolution de longueur d'onde (pm)
0,1	1,6
0,2	3,2
0,3	4,8
0,5	8,0
1,0	16,0
2,0	32,1
3,0	48,1

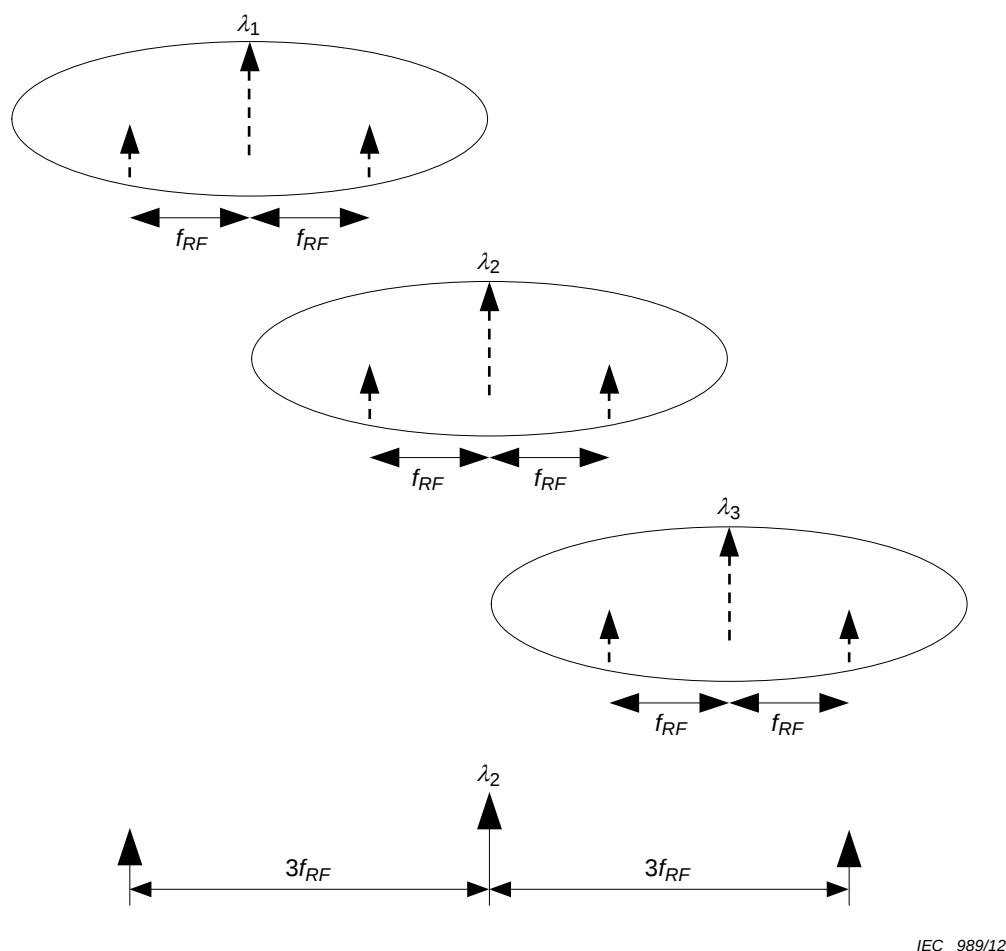


Figure 4 – Échantillonnage à la fréquence de modulation

6.1.3 Séquence d'essais

En utilisant le montage représenté Figure 1, suivre les étapes suivantes:

- (1) Une forme d'onde sinusoïdale est produite par un générateur RF. La fréquence f_{RF} est typiquement choisie dans une gamme de 100 MHz à 3 GHz. Cette forme d'onde sinusoïdale sera utilisée pour exciter le modulateur d'amplitude et pour synchroniser le détecteur de phase D1 et D2. Facultativement, la fréquence f_{RF} est choisie en fonction de l'espacement des échantillons de longueur d'onde, de telle sorte que des échantillons consécutifs se recouvrent comme cela est représenté Figure 4.
- (2) Facultativement, le contrôleur de polarisation est ajusté pour être à une polarisation linéaire de 0°. L'orientation réelle de cette polarisation est arbitraire, mais se rapporte habituellement à l'état produit dans le contrôleur de polarisation. D'autres états de polarisation sont référencés à celui-ci à l'étape 7.
- (3) Sans DUT attaché, connecter un cordon de connexion entre TJ1 et TJ2. Balayer la longueur d'onde de la source laser accordable, en enregistrant les longueurs d'onde et les phases de D1 et de D2 pour des points avec l'espacement des échantillons de longueur d'onde choisi. Les résultats sont donnés dans une matrice de valeurs $(\lambda_i, \varphi_{Ref}(D1)_i, \varphi_{Ref}(D2)_i)$. Ceci fournit une référence "zéro perte" pour normaliser la phase du signal du DUT.
- (4) Attacher le DUT à TJ1 et à TJ2. Balayer la longueur d'onde de la source laser accordable, en enregistrant les longueurs d'onde et les phases de D1 et de D2 pour des points avec l'espacement des échantillons de longueur d'onde choisi. Les résultats sont donnés dans

une matrice de valeurs $(\lambda_i, \varphi_{\text{DUT}}(\text{D1})_i, \varphi_{\text{DUT}}(\text{D2})_i)$. Ceci fournit une phase du signal du DUT.

- (5) Les étapes 3 et 4 peuvent être répétées individuellement pour réduire le bruit aléatoire dans les mesures de phase en "moyennant" les balayages multiples.
- (6) Facultativement, comme cela est décrit en 6.1.2, si la fréquence de modulation f_{RF} est égale à l'espacement des échantillons de longueur d'onde, un lissage par échantillonneur monocanal peut être appliqué pour réaliser les mesures comme si elles avaient été acquises à des fréquences de modulation plus élevées.
- (7) Comme extension facultative mais recommandée, les étapes 3 à 6 peuvent être reproduites avec le contrôleur de polarisation dans les états de polarisation linéaire 45° et 90°, et le quatrième état sur le pôle de la sphère de Poincaré pour la polarisation circulaire. Ceci permet de déterminer la moyenne du retard de groupe sur tous les états d'entrée de polarisation.

6.1.4 Notification spéciale pour la mesure de la fluctuation du retard de groupe

La résolution en longueur d'onde doit être choisie avec soin pour être optimisée sur la période de la fluctuation du retard de groupe du DUT. Une plus grande résolution en longueur d'onde réduit le bruit sur le retard de groupe, mais dégrade la capacité à repérer les fluctuations du retard de groupe dû au lissage.

6.1.5 Calcul du retard de groupe relatif

En 6.1.3, l'étape 3 et l'étape 4 fournissent une référence "zéro perte" et les mesures de phase du signal de DUT. Le retard de groupe relatif à la longueur d'onde λ_i peut être calculé par la formule suivante

$$\tau_g(\lambda_i) = \frac{(\varphi_{\text{DUT}}(\text{D2})_i - \varphi_{\text{Ref}}(\text{D2})_i) - (\varphi_{\text{DUT}}(\text{D1})_i - \varphi_{\text{Ref}}(\text{D1})_i)}{2\pi f_{\text{RF}}} 10^{12} \quad (7)$$

où φ est la phase en radians, f_{RF} est la fréquence de modulation en Hz et le retard de groupe est ps.

6.2 Méthode de l'interférométrie de longueurs d'onde balayées

6.2.1 Principe de mesure

Cette méthode utilise un interféromètre optique et une source de lumière cohérente accordable pour mesurer la dépendance par rapport à la longueur d'onde de la phase optique de la lumière, φ , transférée par le DUT. Le retard de groupe absolu est alors calculé selon sa définition comme la dérivée de la phase en fonction la fréquence optique,

$$\text{GD} = \frac{d\varphi}{d\omega} \quad (8)$$

Ici, la phase φ se rapporte à l'onde optique (électromagnétique), et ω est la fréquence optique, exprimée en rad/s. Par exemple, l'intensité du champ électrique de la lumière se propageant dans le vide dans la direction x peut être exprimée par la formule

$$E(x,t) = E_0 \cos\left(2\pi\left(\frac{x}{\lambda}\right) - \omega t\right) \quad (9)$$

où l'argument de la fonction cosinus est la phase, φ , et l'amplitude du champ E_0 est proportionnelle à la racine carrée de la puissance optique.

Cette méthode est différente de la méthode D de la CEI 60793-1-42, appelée "interférométrie", pour mesurer la dispersion chromatique des fibres optiques, dans lesquelles une source de lumière de faible cohérence est utilisée. Dans cette méthode D, c'est la longueur du bras de référence de l'interféromètre qui varie pour être adaptée à la longueur optique du bras comprenant le DUT. Cette méthode n'est pas appropriée pour mesurer des composants comme des filtres exigeant une résolution de longueur d'onde élevée, parce qu'une source de lumière à bande large est nécessaire pour fournir la bonne résolution du retard de groupe.

L'interféromètre mesure la variation relative en fonction de la longueur d'onde dans la phase de la lumière du DUT en fonction de la lumière traversant le chemin de référence. Quand la phase est telle que la lumière se combine de manière constructive, la puissance est plus élevée au niveau du détecteur qu'en présence de la lumière du chemin de référence uniquement. Quand la lumière se combine de manière destructive, la puissance est inférieure. Généralement, le niveau de puissance oscille lorsque la longueur d'onde est balayée, parce que la phase avance à des cadences différentes dans les deux chemins lorsque la longueur d'onde varie, si leurs longueurs optiques sont différentes. Plus la différence de longueur de chemin est grande, plus vite la puissance détectée varie avec la longueur d'onde. La période de l'oscillation, $\Delta\lambda$, est donnée par

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / \Delta L \quad (10)$$

où ΔL est la largeur du chemin optique. Noter que pour une différence de 1 m, on obtient une période de 2,4 pm seulement. Si la différence est de 10 m, alors la période est 0,24 pm seulement. Il convient donc qu'un montage assez flexible pour mesurer différents dispositifs sans reconfiguration soit capable de mesurer avec une résolution de longueur d'onde inférieure à 0,1 pm.

Après avoir enregistré la trace de la puissance en fonction de la longueur d'onde, c'est-à-dire l'interférogramme, la dépendance de la phase par rapport à la fréquence optique peut être extraite, ce qui permet alors de calculer le retard de groupe absolu. Le retard de groupe est donc également fonction de la fréquence ou de la longueur d'onde.

6.2.2 Séquence d'essais

En utilisant le montage représenté Figure 2, suivre les étapes suivantes:

- (1) Sans DUT attaché, de sorte que TJ1 et TJ2 ne sont pas connectés, ajuster le contrôleur de polarisation pour obtenir une puissance égale au niveau de D1 et de D2. Ceci établit le premier état d'entrée de polarisation. Il est recommandé de faire cet ajustement avec la source laser accordable réglée sur le milieu de la gamme de longueur d'onde à mesurer. Il convient que la directivité soit inférieure à 50 dB pour brancher le dispositif.
- (2) Attacher le DUT à TJ1 et à TJ2. Le spectre de réflectivité du DUT peut également être mesuré, par exemple en utilisant un coupleur 2×2 au niveau de RBD2 et en attachant TJ2 au port supplémentaire sur le côté gauche de RBD2. Pour des mesures de faible incertitude, il est préférable d'attendre quelques minutes après le raccordement pour laisser la température et la position des fibres amorce se stabiliser.
- (3) Balayer la longueur d'onde de la source laser accordable, en enregistrant les longueurs d'onde et les signaux provenant de D1 et de D2 pour des points avec un espacement inférieur ou égal à 0,1 pm, en fonction de la longueur du DUT. Le résultat est une matrice de valeurs $(\lambda_i, P1_i, P2_i)$.
- (4) Facultativement, une mesure de normalisation avec un cordon de connexion entre TJ1 et TJ2 peut également être effectuée. Ceci fournit une référence "zéro perte" pour normaliser l'amplitude du signal du DUT, ce qui permet de mesurer précisément l'affaiblissement. Cette mesure produit également une matrice de valeurs $(\lambda_i, N1_i, N2_i)$, où N est la trace de puissance de chaque détecteur.
- (5) Les étapes 3 et 4 peuvent être répétées pour réduire le bruit aléatoire dans les spectres en "moyennant" les balayages multiples. Toutefois, puisqu'on ne souhaite pas lisser les

oscillations d'interférence dans ce processus, il convient de calculer la moyenne des résultats de l'analyse sur les matrices de données brutes des étapes 3 et 4.

- (6) Comme extension facultative mais recommandée, les étapes 2 à 5 peuvent être reproduites pour le deuxième état de polarisation ajusté sur l'état orthogonal par rapport au premier état de polarisation, en utilisant le contrôleur de polarisation. Ceci permet de déterminer la moyenne du retard de groupe sur tous les états d'entrée de polarisation et la moyenne du retard de groupe différentiel.

6.2.3 Notification spéciale pour la mesure de la fluctuation du retard de groupe

La résolution en longueur d'onde doit être choisie avec soin pour être optimisée sur la période de la fluctuation du retard de groupe du DUT. Une plus grande résolution en longueur d'onde réduit le bruit sur le retard de groupe, mais dégrade la capacité à repérer les fluctuations du retard de groupe dû au lissage.

6.2.4 Calcul du retard de groupe

Le résultat de l'étape 3 ci-dessus produit deux interférogrammes, donnés par les matrices (λ_i , $P1_i$) et (λ_i , $P2_i$). (En incluant les résultants de l'étape 6, il y a quatre tels interférogrammes au total.) Ceux-ci sont traités séparément de la même manière dans les calculs suivants. Chacun produira un spectre de retard de groupe, qui peut être différent si le DUT a un retard de groupe différentiel différent de zéro.

Les valeurs de l'interférogramme, exprimées par $P(\omega)$ en fonction de $\omega = 2\pi c / \lambda$, sont données par la formule suivante:

$$P(\omega) = R(\omega) + D(\omega) + 2\sqrt{R(\omega)}\sqrt{D(\omega)}\cos(\phi(\omega)) \quad (11)$$

où R est la puissance au niveau du détecteur provenant du chemin de référence, D est la puissance au niveau du détecteur provenant du DUT et ϕ est la différence de phase optique entre les deux chemins optiques. Tous ces éléments sont fonction de ω . Obtenir le troisième terme de cette équation avec l'information de phase, l'interférogramme $P(\omega)$ est soumis à un filtre passe-haut. La coupure du filtre passe-haut peut être estimée en utilisant une transformée de Fourier pour identifier les fréquences d'interférogramme liées au retard de groupe du dispositif. La transformée de Hilbert de ce terme est alors utilisée pour obtenir des valeurs d'amplitude et de phase en fonction de ω :

$$2\sqrt{R(\omega)}\sqrt{D(\omega)} \text{ et } \phi(\omega), \text{ respectivement.} \quad (12)$$

Si nécessaire, on peut ensuite calculer la moyenne de ces matrices sur des balayages de longueur d'onde répétés, comme cela est mentionné à l'étape 5 de 6.2.2. Le nombre élevé de points de données peut maintenant également être réduit à la résolution de longueur d'onde souhaitée, en utilisant une moyenne par échantillonneur monocanal.

Le retard de groupe est maintenant donné par la formule:

$$GD\left(\frac{\omega_{i+1} + \omega_i}{2}\right) = \frac{\phi(\omega_{i+1}) - \phi(\omega_i)}{\omega_{i+1} - \omega_i} \quad (13)$$

Ce calcul est effectué pour les interférogrammes des deux détecteurs et les résultats sont moyennés pour former le spectre de retard de groupe moyenné en polarisation pour cet état de polarisation d'entrée, qui peut être exprimé en fonction de ω ou de λ . Le spectre de retard de groupe entièrement moyenné est également obtenu en déterminant la moyenne des résultats pour le retard de groupe obtenu à partir de la même analyse sur les résultats de l'étape 6. Noter que pour une mesure de référence de longueur nulle donnée, les valeurs du retard de groupe sont absolues et indiquent la longueur du dispositif.

La perte d'insertion du DUT peut également être déterminée à partir de ces données, après avoir effectué une analyse similaire sur les résultats de normalisation de l'étape 4 pour obtenir $2\sqrt{R(\omega)}\sqrt{D_N(\omega)}$ comme l'amplitude de la transformée de Hilbert des données $N(\omega)$ correspondantes. Alors le transfert de polarisation moyennée T_{ave} du DUT est donné par

$$T_{ave}(\omega) = \sum \frac{R(\omega)D(\omega)}{R(\omega)D_N(\omega)} \quad (14)$$

où la somme se fait sur des valeurs des deux, ou des quatre si l'étape 6 est utilisée, interférogrammes à résolution de polarisation.

La perte d'insertion moyenne du dispositif est alors donné par la moyenne de ceci à partir des interférogrammes des deux détecteurs, exprimés en dB.

$$IL(\omega) = -10 \log(T_{ave}(\omega)) \quad (15)$$

6.3 Méthode du déphasage par polarisation

6.3.1 Fréquence de modulation

La fréquence de modulation doit être choisie en se basant sur la résolution de longueur d'onde requise et sur le bruit du retard de groupe ou du bruit de dispersion chromatique. Se reporter en 6.3.2 pour plus d'informations.

La résolution en longueur d'onde doit être choisie avec soin pour être optimisée sur la période de la fluctuation du retard de groupe du DUT. Une plus grande résolution en longueur d'onde réduit le bruit sur le retard de groupe, mais dégrade la capacité à repérer les fluctuations du retard de groupe dû au lissage.

6.3.2 Incrément de longueur d'onde

Deux longueurs d'onde sont nécessaires pour obtenir une valeur de la dispersion chromatique parce qu'on utilise la différentiation de longueurs d'onde dans cet incrément de longueur d'onde, $\Delta\lambda$, pour calculer une dispersion chromatique. La différence de phase qui peut être mesurée avec le comparateur de phase est inférieure à ± 180 degrés. Par conséquent, la différence maximale du retard de groupe, $\Delta\tau_{max}$ qui peut être mesurée entre les longueurs d'onde contiguës est donnée par l'expression suivante:

$$\Delta\tau_{max} \leq \left| \pm \frac{180}{360} \times \frac{10^3}{f} \right| = \frac{10^3}{2f} \quad (16)$$

Cet incrément de longueur d'onde, $\Delta\lambda$, s'appellera la taille de pas de longueur d'onde. Pour mesurer jusqu'à une certaine valeur, la taille de pas de longueur d'onde est déterminée comme suit.

$$\Delta\lambda \leq \left| \pm \frac{\Delta\tau_{max}}{CD_{max}} \right| \quad (17)$$

où

$\Delta\lambda$ est la taille de pas de longueur d'onde (nm),

$\Delta\tau_{max}$ est le retard de groupe maximal du DUT en ps,

f est la fréquence de modulation en GHz, et

$CD_{\max}$ est la dispersion chromatique maximale à mesurer en ps/nm.

L'incrément minimum de longueur d'onde de la source de longueur d'onde variable doit être choisi pour être optimisé sur la période de la fluctuation du retard de groupe du DUT.

6.3.3 Balayage des longueurs d'onde et mesure de la dispersion chromatique

La source de laser accordable sert à effectuer un balayage de longueur d'onde le long de la gamme de longueurs d'onde désirée et la valeur du retard de groupe est calculée pour chaque longueur d'onde. En outre, la valeur de la dispersion chromatique du DUT peut être calculée à partir de la différentiation de longueur d'onde de la valeur du retard de groupe dans chaque longueur d'onde de mesure basée sur la valeur du retard de groupe qui a été obtenue.

Cette méthode utilise une paire d'ondes polarisées orthogonales (les ondes polarisées linéairement à 0 et 90 degrés). Les ondes polarisées linéairement à 0 et 90 degrés sont injectées dans le DUT et la sortie est séparée en deux composantes d'ondes polarisées par le séparateur de polarisation. Ensuite, on mesure l'amplitude et le retard de groupe des ondes polarisées (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 degré. Pour l'onde polarisée linéairement à 90 degrés, 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 $d\phi_{22}/d\omega_{\text{mea}}$).

6.3.4 Étalonnage

On effectue un étalonnage sur une fibre unimodale de longueur inférieure à 1 m avant de mesurer le DUT. D'abord, on ajuste les lames quart d'onde et demi-onde pour générer l'onde polarisée linéairement à 0 degré qui correspond à l'onde polarisée P du séparateur de polarisation. Ensuite, on génère l'onde polarisée linéairement à 90 degrés qui correspond à l'onde polarisée S du séparateur de 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 de polarisation alors que les ondes polarisées linéairement à 0 degré et 90 degrés sont injectées alternativement. 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 ($d\phi_{11}/d\omega_{\text{cal}}$ et $d\phi_{21}/d\omega_{\text{cal}}$, respectivement) pour l'onde polarisée linéairement à 0 degré. Pour l'onde polarisée linéairement à 90 degrés, 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 ($d\phi_{12}/d\omega_{\text{cal}}$ et $d\phi_{22}/d\omega_{\text{cal}}$). La valeur de la dispersion chromatique est calculée à partir des valeurs mesurées en utilisant l'expression décrite en 6.3.5.

6.3.5 Calcul du retard de groupe relatif et de la dispersion chromatique

Les retards de groupe de la lumière polarisée P et S sont calculés en utilisant des valeurs mesurées dans 6.3.3 et 6.3.4.

$$\begin{aligned}
 \text{Retard de groupe de lumière polarisée P: } \frac{d\Phi_{kl}}{d\omega} &= \frac{d\Phi_{kl}}{d\omega_{\text{mea}}} - \frac{d\Phi_{11}}{d\omega_{\text{cal}}} \quad kl = 11 \text{ et } 12 \\
 \text{Retard de groupe moyen de lumière polarisée P: } \frac{d\Phi_{\text{ave1}}}{d\omega} &= \left(\frac{d\Phi_{11}}{d\omega} + \frac{d\Phi_{12}}{d\omega} \right) / 2 \\
 \text{Retard de groupe de lumière polarisée S: } \frac{d\Phi_{mn}}{d\omega} &= \frac{d\Phi_{mn}}{d\omega_{\text{mea}}} - \frac{d\Phi_{22}}{d\omega_{\text{cal}}} \quad mn = 21 \text{ et } 22 \\
 \text{Retard de groupe moyen de lumière polarisée S: } \frac{d\Phi_{\text{ave2}}}{d\omega} &= \left(\frac{d\Phi_{21}}{d\omega} + \frac{d\Phi_{22}}{d\omega} \right) / 2
 \end{aligned} \tag{18}$$

Les valeurs de retard de groupe et de dispersion chromatique sur chaque longueur d'onde sont calculées dans les expressions suivantes.

Retard de groupe moyen ne dépendant pas de la polarisation: $GD(\lambda) = \left(\frac{d\Phi_{ave1}}{d\omega} + \frac{d\Phi_{ave2}}{d\omega} \right) / 2$ (19)

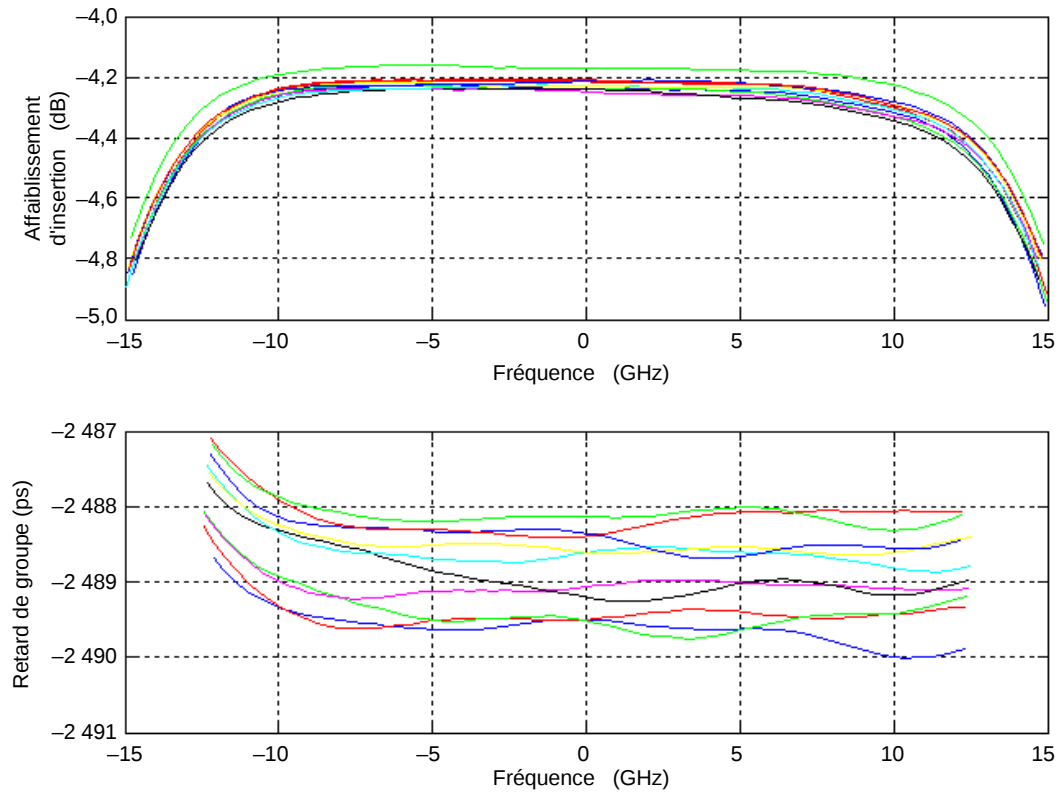
Dispersion chromatique moyenne ne dépendant pas de la polarisation: $CD(\lambda) = \frac{(GD(\lambda + \Delta\lambda) - GD(\lambda - \Delta\lambda))}{2 \times \Delta\lambda}$

L'erreur de la mesure provoquée par dispersion de mode de polarisation peut être exclue du résultat de mesure en obtenant la moyenne du retard de groupe et de dispersion chromatique qui ne dépend pas de la polarisation.

6.4 Fenêtre de mesure (commune pour toutes les méthodes d'essai)

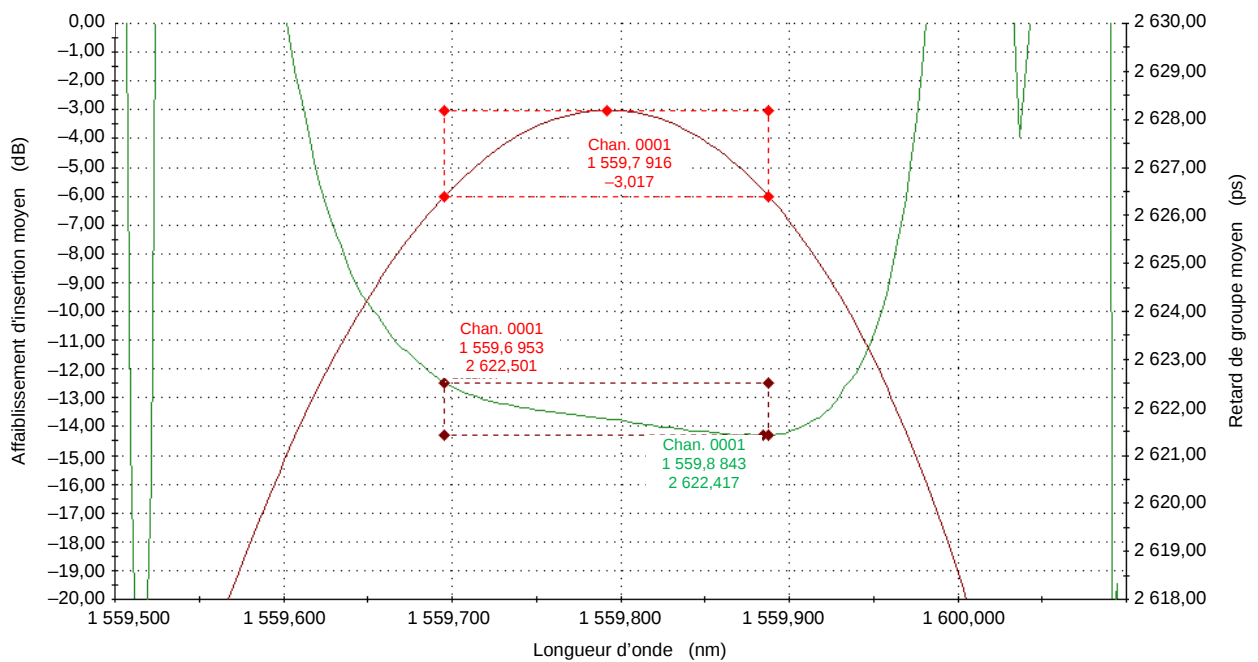
La largeur spectrale de la fenêtre de mesure est typiquement donnée dans la spécification du DUT. Généralement, la fenêtre de mesure est définie de deux manières différentes. D'abord, la fenêtre de mesure est centrée sur une longueur d'onde ITU avec une largeur définie. Par exemple, le retard de groupe doit être analysé dans une largeur de bande optique de 25 GHz centrée sur la fréquence ITU comme cela est représenté à la Figure 5 pour un DUT à plusieurs voies. Chaque voie est tracée en fonction de la fréquence ITU correspondante.

Ensuite, il peut également être nécessaire d'analyser les propriétés de dispersion du DUT dans une fenêtre de mesure qui est définie par les propriétés de perte du DUT. Par exemple, le DUT est un filtre avec une perte dépendant de la longueur d'onde comme cela est indiqué sur la Figure 6. La mesure de dispersion sera effectuée par la suite dans une fenêtre allant de λ_1 à λ_2 . λ_1 et λ_2 sont donnés par les points "-x" en dB de la courbe de perte. Les valeurs typiques de x sont dans la plage comprise entre 0,5 dB et 5 dB.



IEC 990/12

Figure 5 – Fenêtre de mesure centrée sur une longueur d'onde ITU avec une largeur définie



IEC 991/12

Figure 6 – Fenêtre de mesure déterminée par la courbe de perte d'insertion à 3 dB

7 Analyse

7.1 Réduction de bruit de la mesure du retard de groupe

7.1.1 Moyenne

Plusieurs mesures de la différence de phase entre le signal de référence et le signal optique détecté peuvent être moyennées. Si le bruit n'est pas déterministe, le niveau de bruit diminuera de la racine carrée du nombre de moyennes. La moyenne ne sacrifie pas la résolution de longueur d'onde, mais introduit un compromis sur le temps.

7.1.2 Filtrage spectrale

Des méthodes de filtre peuvent être appliquées pour réduire le bruit de mesure. Le filtre le plus communément appliqué est la moyenne sur une fenêtre spectrale définie. Lorsque des composants de multiplexage par répartition en longueur d'onde à forte densité sont caractérisés, les largeurs typiques de telles fenêtres sont comprises entre 5 et 10 pm. Les composants à bande large peuvent autoriser des largeurs de fenêtre pouvant atteindre 1 nm et plus. On doit prendre en considération que le spectre du signal optique est élargi en raison de la modulation RF et donc il présente déjà une valeur de mesure de spectre moyenné. Pour ces raisons, il est nécessaire de définir la fréquence RF appliquée et la largeur de la fenêtre de filtrage spectrale dans le protocole de mesure.

Pour des composants de multiplexage par répartition en longueur d'onde à forte densité, en faisant la moyenne sur une région spectrale, plusieurs points de mesure sur une fenêtre spectrale sont moyennés. Ceci donne des courbes de mesure plus lisses en réduisant la résolution spectrale. On doit prendre particulièrement soin de ne pas moyenniser les détails importants de la mesure.

7.2 Variation de phase linéaire

Si la réponse de phase d'un système de phase linéaire est strictement linéaire, elle causera un retard, mais pas de déformation. Tout écart par rapport à la linéarité dans la largeur de bande du signal déformera le signal.

Le système de phase linéaire s'exprime sous la forme:

$$\phi(f_{\text{opt}}) = \phi(f_{\text{opt}0}) + 2\pi\tau_g(f_{\text{opt}} - f_{\text{opt}0}) \quad (20)$$

où le retard de groupe τ_g est constant. Pour la plupart des composants, un ajustement linéaire de la phase est effectué, puis cette courbe linéaire est soustraite de la phase d'origine. La valeur de phase restante est le départ de la phase linéaire.

7.3 Dispersion chromatique

7.3.1 Généralités

Il est bien connu que la dispersion chromatique est la dérivée du retard de groupe en fonction de la longueur d'onde.

$$CD(\lambda) = \frac{d\tau_g(\lambda)}{d\lambda} \quad (21)$$

Toutefois, dans la pratique, cette dérivée doit être calculée numériquement.

$$CD(\lambda_i) = \frac{\tau_g(\lambda_{i+1}) - \tau_g(\lambda_{i-1})}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}} \quad (22)$$

où $i = 1, 2, \dots, n$. $\Delta\lambda = \lambda_{i+1} - \lambda_i = \lambda_i - \lambda_{i-1}$ représente l'espacement des échantillons de longueur d'onde. Si l'espacement des échantillons de longueur d'onde $\Delta\lambda$ est relativement petit, le bruit du retard de groupe sera amplifié dans le calcul de la dispersion chromatique. Il existe de nombreuses manières de minimiser le bruit calculé de la dispersion chromatique. Habituellement, deux méthodes sont recommandées.

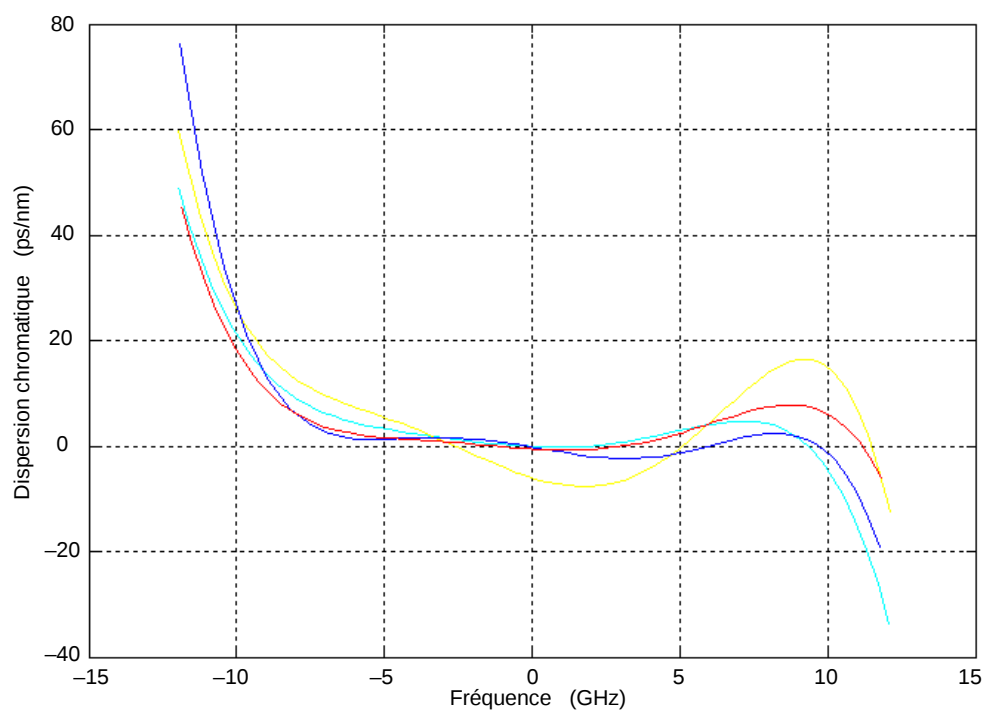
7.3.2 Calcul de différence finie

La méthode du filtrage (ou de la moyenne) spectrale est appliquée pour réduire le bruit du retard de groupe avant d'effectuer le calcul de la dispersion chromatique. Elle s'applique habituellement aux dispositifs à bande étroite. Le nombre de points de mesure filtrés (ou moyennés) sur une fenêtre spectrale dépend de l'amélioration du bruit de dispersion chromatique, en évitant de moyenner les détails importants de la mesure et sans déformer la courbe de retard de groupe traitée.

7.3.3 Ajustement de courbe

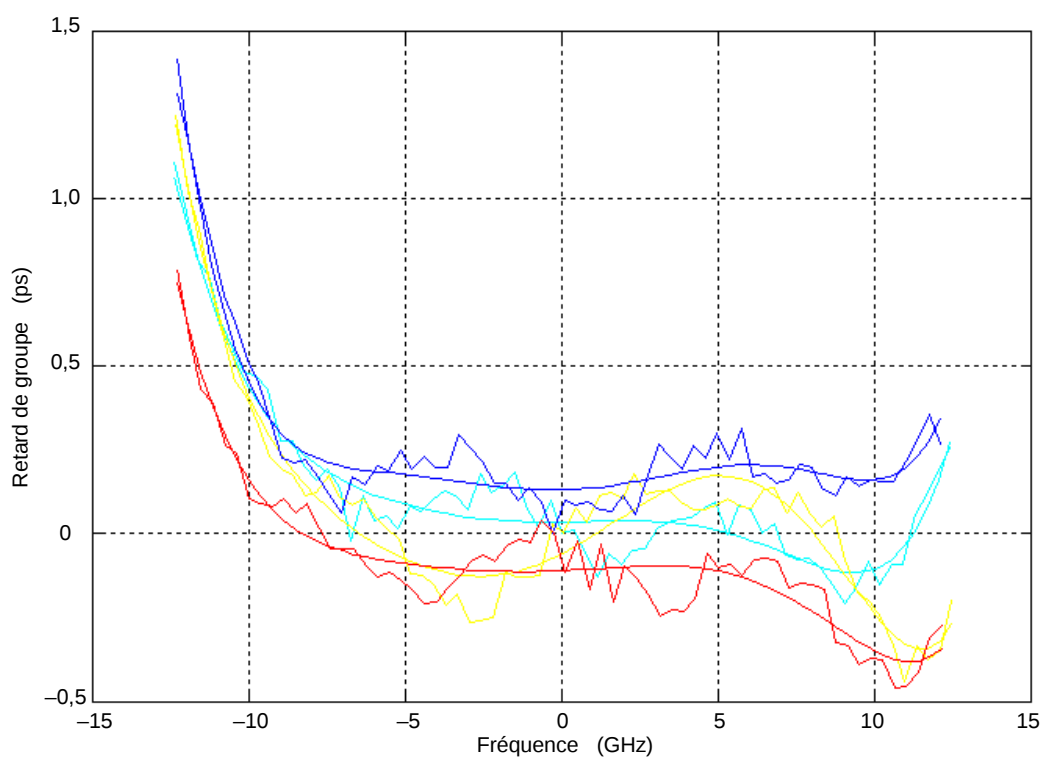
Une courbe est adaptée, par la méthode des moindres carrés, aux données du retard de groupe sur une fenêtre de mesure définie en 5.1.5. La dispersion chromatique est calculée à partir de la différentiation de la courbe de retard de groupe adaptée par rapport à la longueur d'onde afin de réduire le bruit du retard de groupe. Elle est normalement appliquée à un dispositif à bande large, c'est-à-dire une longue bobine de fibre. Toutefois, si la variation du retard de groupe est relativement douce dans la fenêtre de mesure, cette méthode peut également s'appliquer au dispositif à bande étroite. Un exemple de DUT à plusieurs voies est représenté à la Figure 7. La dispersion chromatique est traitée des manières suivantes pour chaque canal.

- 1) Une courbe polynômiale du 6^{ème} ordre est adaptée, par la méthode des moindres carrés, aux données de retard de groupe sur une largeur de bande optique de 25 GHz centrée sur la fréquence ITU comme cela est représenté à la Figure 8.
- 2) Le décalage de fréquence, en GHz, par rapport à la fréquence de grille ITU est utilisé pour que l'axe de la fréquence minimise les exigences de position décimale pour un bon ajustement. L'ajustement est inférieur à $\pm 0,5$ ps des données brutes.
- 3) La dispersion chromatique est calculée à partir de la différentiation de la courbe de retard de groupe adaptée par rapport à la longueur d'onde. Le pas de longueur d'onde utilisée pour le calcul est 6 pm.



IEC 992/12

Figure 7 – Dispersion chromatique calculée à partir d'un retard de groupe adapté sur une largeur de bande optique de 25 GHz centrée sur la fréquence ITU



IEC 993/12

Figure 8 – Courbe polynomiale du 6^{ème} ordre adaptée sur les données de retard de groupe relatif sur une largeur de bande optique de 25 GHz centrée sur la fréquence ITU

7.4 Fluctuation de phase

7.4.1 Généralités

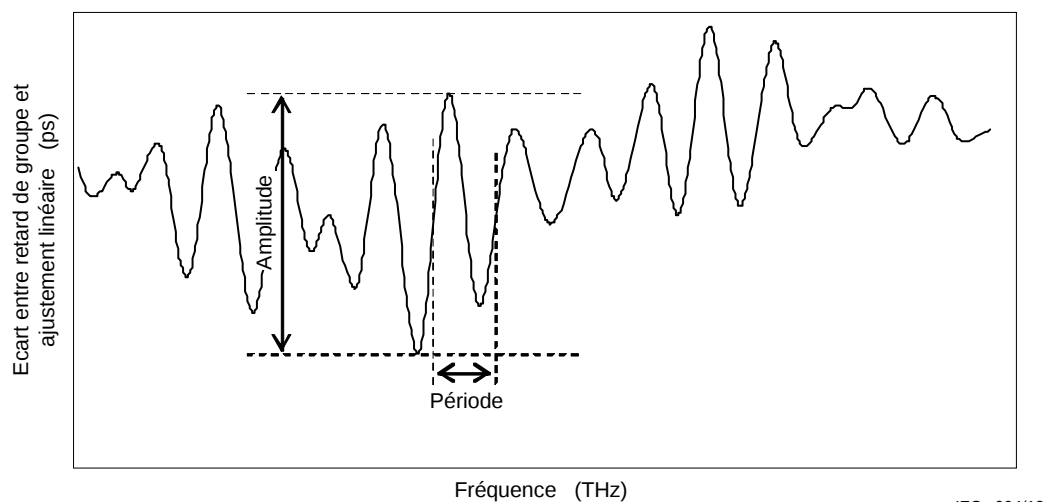
La méthode consistant à estimer la fluctuation de phase à partir des données de mesure du retard de groupe est représentée ci-dessous. Elle est valide uniquement pour des compensateurs de dispersion de multiplexage par répartition en longueur d'onde à forte densité.

7.4.2 Adaptation de pente

Calculer la valeur d'adaptation linéaire des résultats des mesure de retard de groupe pour la largeur de bande spécifiée dans les spécifications de DUT (sauf spécification contraire, la largeur de bande de 3 dB des caractéristiques de perte d'insertion), en utilisant la méthode des moindres carrés et obtenir l'écart entre le retard linéaire et le retard de groupe. Ces valeurs contiennent des fluctuations de retard de groupe.

7.4.3 Estimation des fluctuations du retard de groupe

Déterminer l'amplitude et la période de la fluctuation du retard de groupe en utilisant le résultat précédent. Il convient de déterminer l'amplitude sur deux cycles de fluctuation du retard de groupe. Il convient de choisir l'amplitude maximale dans la gamme de mesure comme la fluctuation du retard de groupe crête-à-crête. Il convient de choisir la période comme la moyenne sur plusieurs cycles comprenant l'amplitude maximale. Déterminer la période basée sur le croisement des valeurs moyennes du retard de groupe pour chaque fluctuation. La Figure 9 représente un exemple d'estimation des fluctuations du retard de groupe. Ceci fonctionne uniquement si la fluctuation de retard de groupe est tracée en fonction de la fréquence.



IEC 994/12

Figure 9 – Estimation de l'amplitude de la fluctuation du retard de groupe et la période

7.4.4 Calcul de la fluctuation de phase

Calculer la fluctuation de phase crête-à-crête ($\Delta\theta$) à partir de la fluctuation du retard de groupe en utilisant l'équation suivante:

$$\Delta\theta = f_{\text{period}} * A_{\text{rip}} \text{ (unité: radians)} \quad (23)$$

où:

A_{rip} est la fluctuation de retard de groupe crête-à-crête (unité: s)

f_{period} est la période de la fluctuation de retard de groupe (unité: Hz).

8 Exemples de mesure

8.1 Filtre passe-bande à couche mince 50 GHz

Les résultats des exemples pour les spectres de retard de groupe et de perte d'un filtre passe bande à couche mince de 50 GHz sont représentés sur la Figure 10.

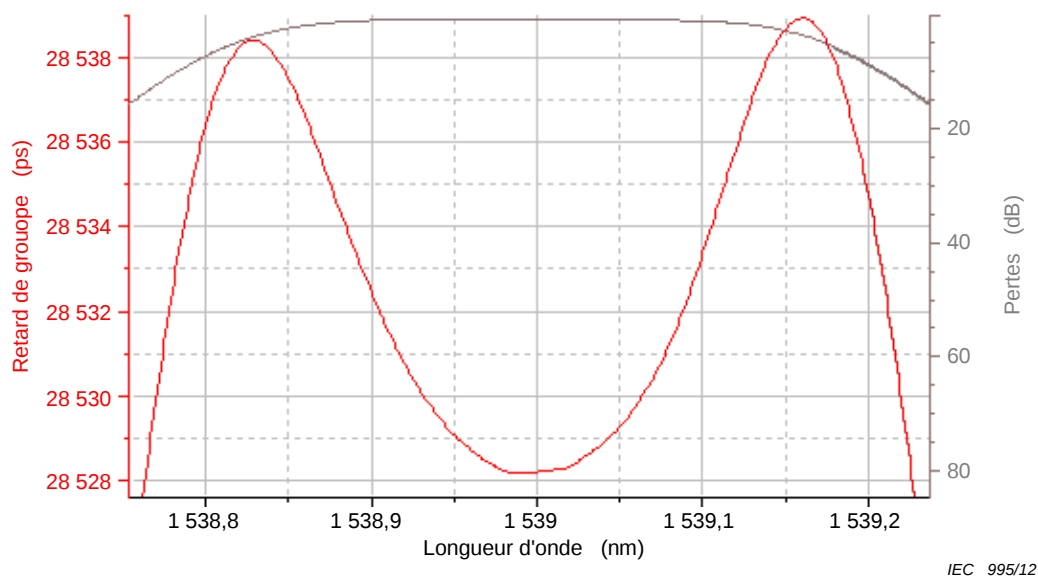


Figure 10 – Spectre de retard de groupe et de perte pour filtre à multiplexage par répartition en longueur d'onde à forte densité à espacement entre voies de 50 GHz

8.2 Composants à filtres à guides d'ondes plans

Les Figures 11 et 12 représentent des exemples de mesure du retard de groupe et de dispersion chromatique pour un composant filtre à guide d'ondes plan.

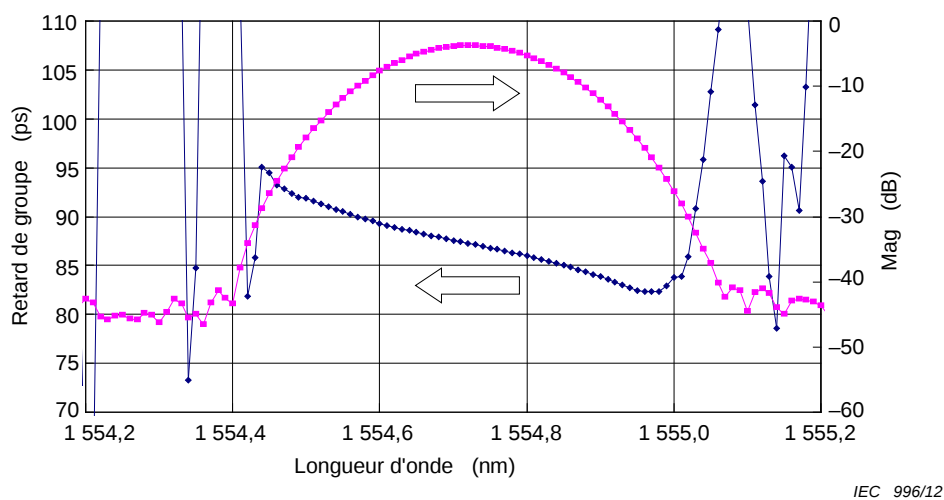


Figure 11 – Spectres de retard de groupe et de perte mesurés pour un filtre à guide d'ondes plan

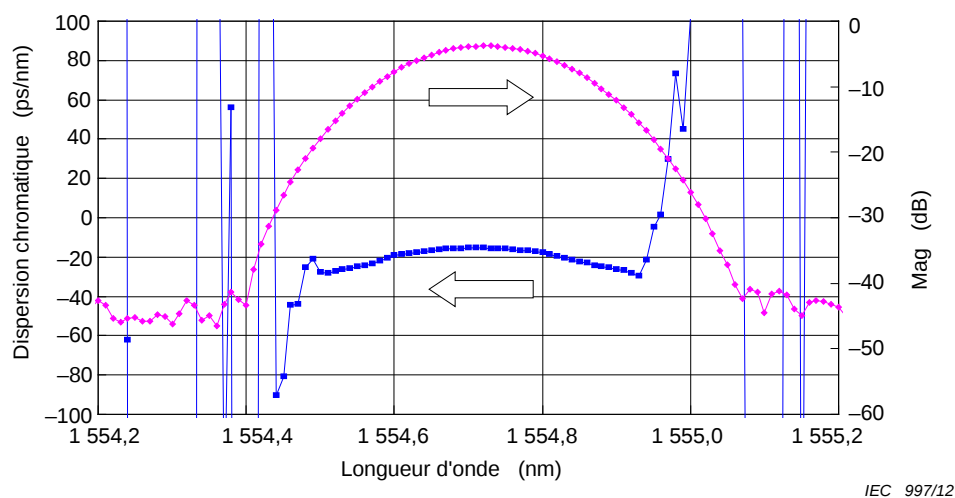


Figure 12 – Spectres de dispersion chromatique et de perte mesurés pour un filtre à guide d'ondes plan

8.3 Compensateur de dispersion accordable (réseau de Bragg de fibres)

Les Figures 13 et 14 représentent des exemples d'écart de retard de groupe par rapport à la mesure d'ondulation de phase et d'adaptation linéaire pour un réseau de Bragg de fibres utilisant la méthode du déphasage par modulation moyen de la polarisation. La fréquence de modulation f_{RF} est 500 MHz.

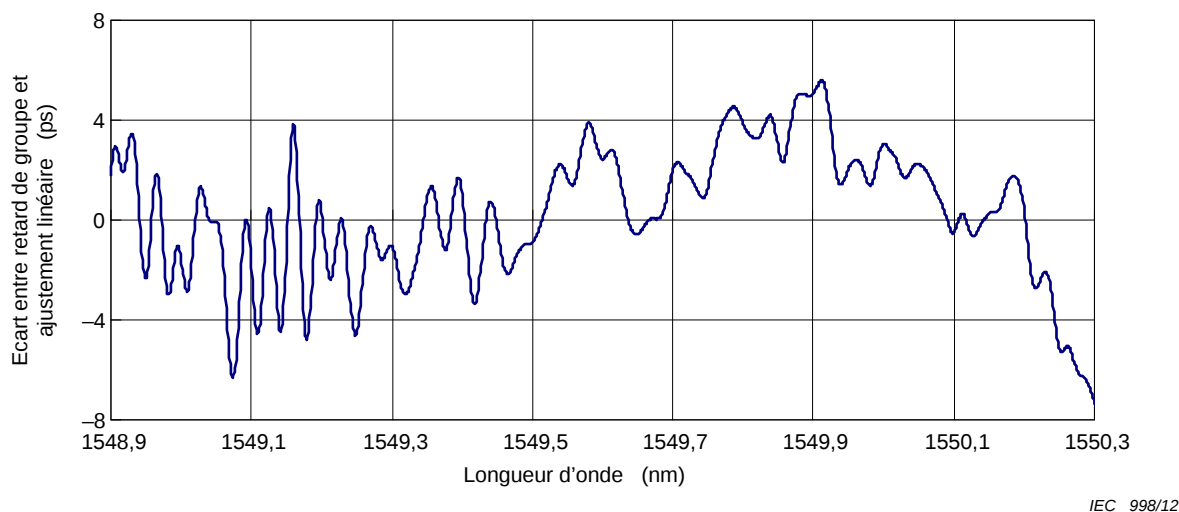


Figure 13 – Ecart de retard de groupe mesuré d'un réseau de Bragg de fibres

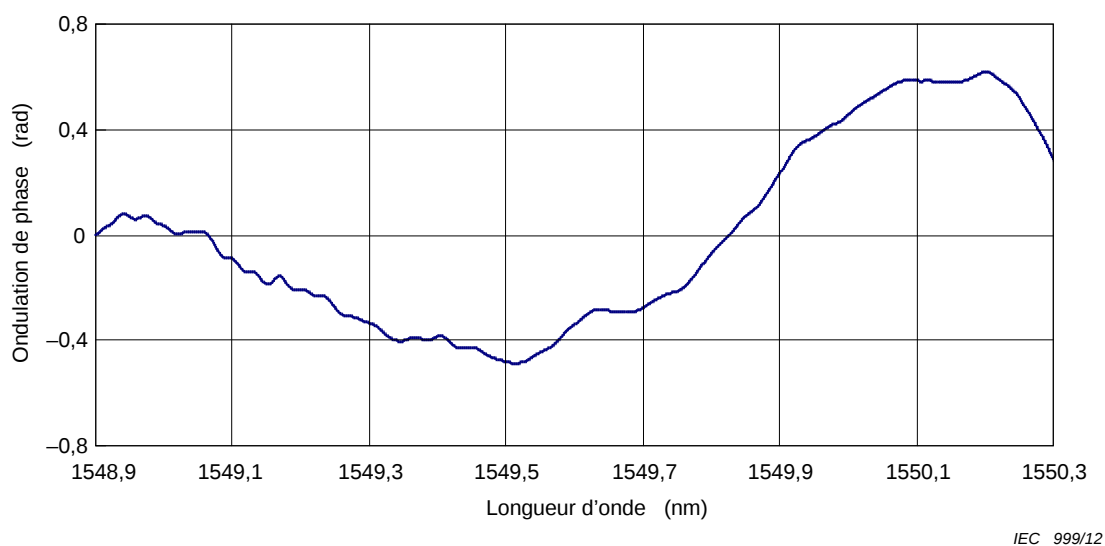


Figure 14 – Ecart d'ondulation de phase mesuré d'un réseau de Bragg de fibres

8.4 Dispositif de couplage de mode de polarisation aléatoire

La Figure 15 représente un exemple de mesure de retard de groupe pour un dispositif avec couplage de mode de polarisation aléatoire, montrant l'avantage de moyenner le retard de groupe sur les états de polarisation. Sans déterminer la moyenne, la courbe du retard de groupe peut varier d'une moitié de retard de groupe différentiel.

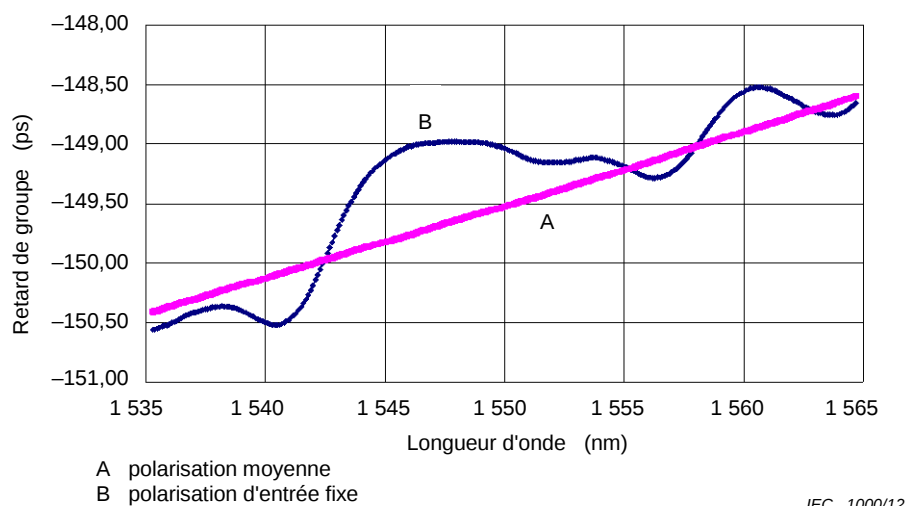
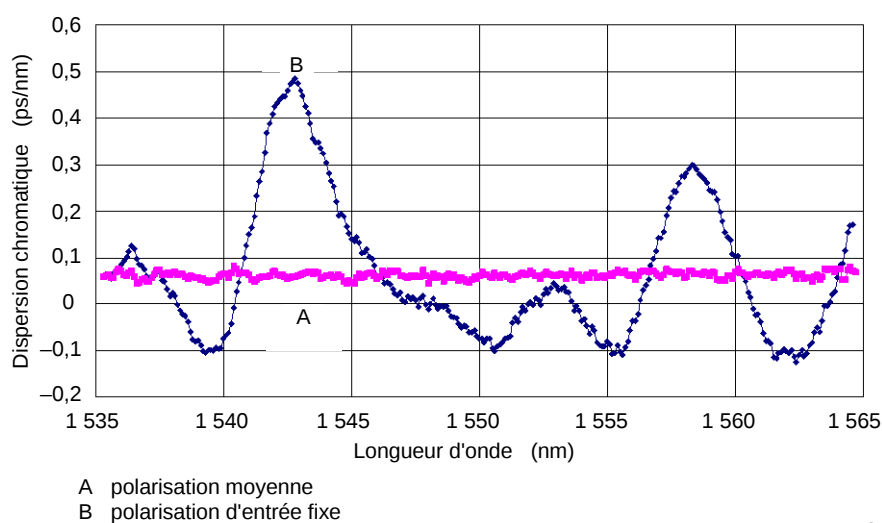


Figure 15 – Retard de groupe mesuré pour un dispositif avec couplage de mode de polarisation aléatoire

La Figure 16 représente un exemple de mesure de dispersion chromatique pour un dispositif avec couplage de mode de polarisation aléatoire.



IEC 1001/12

Figure 16 – Retard de dispersion chromatique pour un dispositif avec couplage de mode de polarisation aléatoire

9 Détails à spécifier

Les détails suivants doivent être spécifiés.

- Incertitude de mesure
- Méthode d'essai utilisée
- Plage de longueurs d'onde
- Précision de longueur d'onde
- Résolution de longueur d'onde
- Caractéristiques environnementales (T, P, H)
- Fréquence de modulation RF
- Nombre de moyennes de la mesure de phase
- Fenêtre de moyenne spectrale

Annexe A (informative)

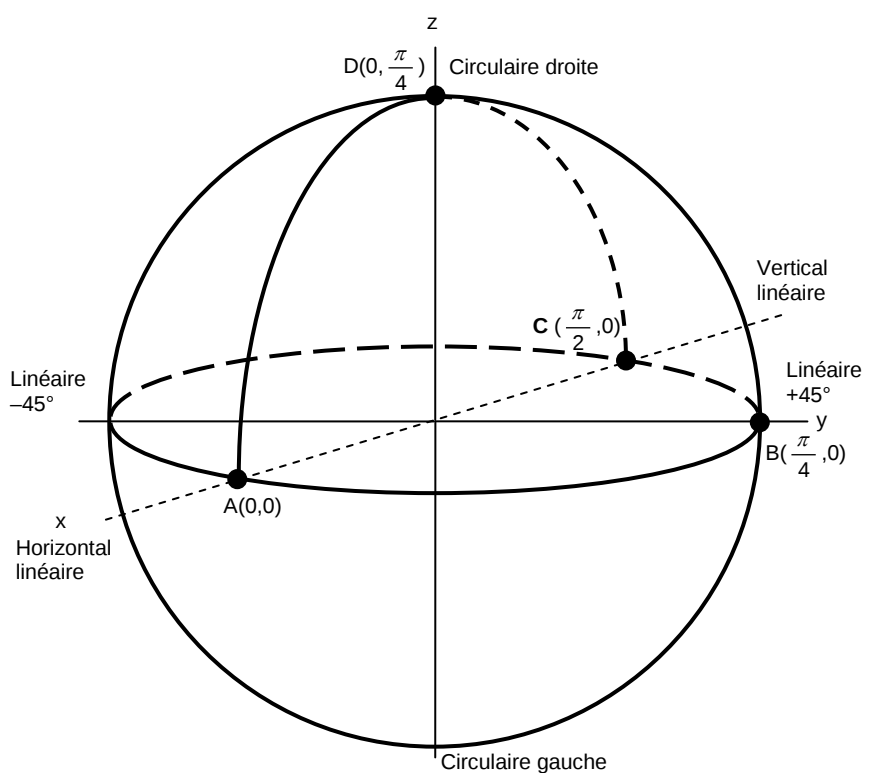
Calcul du retard de groupe différentiel

A.1 Généralités

Les méthodes de la présente Norme utilisent des sources de lumière polarisées. Pour la mesure des composants dépendants de la polarisation, ce qui est souvent le cas, il convient d'effectuer la mesure pour un ensemble suffisant de polarisations d'entrée pour assurer la détermination du spectre de retard de groupe moyen par polarisation, comme décrit en 6.1. Une telle procédure fournit également des données mesurées suffisantes pour déterminer le spectre du retard de groupe différentiel, $DGD(\lambda)$, comme cela est décrit dans cette Annexe. Cette annexe est destinée à fournir un support pour les mesures simultanées de retard de groupe et de retard de groupe différentiel avec le même appareil de mesure. Des méthodes dédiées spécifiquement au retard de groupe différentiel et à la dispersion de mode de polarisation sont décrites dans la CEI 61300-3-32 et dans la CEI 61282-9.

A.2 Calcul du retard de groupe différentiel à partir des mesures faites avec la méthode du déphasage par modulation à 4 états de polarisation d'entrée

Cette méthode exige de répéter les étapes 3 à 6 de 6.1.3 pour quatre différents états d'entrée de polarisation, choisis dans un ensemble de Mueller d'états de polarisation d'entrée. 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 (voir Figure A.1).



IEC 1002/12

Figure A.1 – 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 A.1). 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 sphérique 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.

$$s_0 = \begin{bmatrix} \cos 2\theta \\ \sin 2\theta \cos \mu \\ \sin 2\theta \sin \mu \end{bmatrix} \quad j_0 = \begin{bmatrix} \cos \theta \exp[-j\mu/2] \\ \sin \theta \exp[j\mu/2] \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Le Tableau A.1 représente un exemple d'ensemble de Mueller.

Tableau A.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)

Pour chaque position, A, B, C, D, mesurer les déphasages (radians), appelés $\phi_A(\lambda)$, $\phi_B(\lambda)$, $\phi_C(\lambda)$, $\phi_D(\lambda)$, respectivement, comme au 6.1.3.

Calculer la phase moyenne des deux états principaux de polarisation (PSP) $\phi_{RF}(\lambda)$, comme suit:

$$\phi_{RF}(\lambda) = \frac{\phi_A(\lambda) + \phi_C(\lambda)}{2} \quad (\text{A.2})$$

Ajuster les valeurs des phases mesurées par la phase moyenne comme suit:

$$\begin{aligned} \phi_{RF,A}(\lambda) &= \phi_A(\lambda) - \phi_{RF}(\lambda) \\ \phi_{RF,B}(\lambda) &= \phi_B(\lambda) - \phi_{RF}(\lambda) \\ \phi_{RF,D}(\lambda) &= \phi_D(\lambda) - \phi_{RF}(\lambda) \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

Calculer la différence de phase $\delta_{RF}(\lambda)$ comme suit:

$$\delta_{RF}(\lambda) = 2 \arctan \left\{ \left[\tan^2(\phi_{RF,A}(\lambda)) + \tan^2(\phi_{RF,B}(\lambda)) + \tan^2(\phi_{RF,D}(\lambda)) \right]^{1/2} \right\} \quad (\text{A.4})$$

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:

$$\text{DGD}(\lambda) = 10^3 \frac{\delta_{RF}(\lambda)}{2\pi f} \quad (\text{A.5})$$

A.3 Calcul du retard de groupe différentiel à partir des mesures faites avec la méthode du déphasage par modulation tout en balayant les états de polarisation d'entrée, "méthode de tous les états"

Cette mesure peut être faite en balayant l'état de polarisation d'entrée avec le contrôleur de polarisation de la Figure 1, tout en fixant la source de longueur d'onde variable des pas de longueurs d'onde fixes, et en mesurant le retard de groupe relatif pour un grand ensemble d'états de polarisation. Le retard de groupe différentiel, exprimé en ps, est déterminé comme la différence entre les valeurs maximales et minimales du retard de groupe à une longueur d'onde particulière.

Pour obtenir la précision souhaitée, il est nécessaire de s'assurer que l'ensemble d'états de polarisation est suffisamment grand, en balayant à une vitesse suffisamment grande ou pendant un temps assez long, et qu'il présente une résolution de polarisation suffisante, en moyennant les échantillons individuels pendant une durée suffisamment petite par rapport à la cadence de balayage de polarisation.

Une amélioration du niveau de bruit et donc de la précision de la détermination du retard de groupe différentiel peut être obtenue en évaluant la distribution complète des échantillons du retard de groupe sur l'état de polarisation, au lieu de baser la détermination uniquement sur les deux valeurs de retard de groupe maximal et minimal dans l'ensemble. Lorsque l'état de polarisation d'entrée est balayé de façon aléatoire, l'écart normalisé de la distribution des valeurs du retard de groupe et la gamme entre les valeurs minimales et maximales sont liés par une relation simple. Comme on peut le voir par exemple en considérant la représentation de l'état de polarisation sur la surface de la sphère de Poincaré, la densité des états de polarisation en fonction de la différence entre les composants de la polarisation le long de deux états orthogonaux de polarisation est constante. Quand ces deux états orthogonaux sont choisis pour être les deux états principaux de polarisation, PSP, du composant, ceci signifie qu'il y a une densité constante des états de polarisation par rapport au retard de groupe mesuré, sur la gamme allant du retard de groupe minimal au retard de groupe maximal. Ainsi, la taille de cette gamme peut être obtenue à partir de l'écart type des échantillons de retard de groupe selon l'équation:

$$\text{DGD} = \text{GD}_{\max} - \text{GD}_{\min} = 2\sqrt{3}\sigma \quad (\text{A.6})$$

où σ est l'écart type des échantillons de retard de groupe.

A.4 Calcul du retard de groupe différentiel à partir des mesures faites avec la méthode de l'interférométrie de longueurs d'onde balayées

La méthode de l'interférométrie de longueurs d'onde balayées décrite en 5.2, incluant la mesure à deux états orthogonaux d'entrée de polarisation décrits à l'étape 6 de 6.2.2, donne l'amplitude et la phase des éléments de la matrice de transfert du composant pour deux états orthogonaux d'entrée et de sortie de polarisation. La dépendance de longueur d'onde de cette matrice peut être utilisée pour calculer le retard de groupe différentiel selon la méthode d'analyse des valeurs propres de la matrice de Jones,

La matrice de transfert, $T(\omega)$, à cette fin est assemblée de la façon suivante. A partir des valeurs dépendant de ω de l'amplitude et de la phase pour les deux états de sortie de polarisation au niveau du premier état d'entrée de polarisation, les éléments T11 et T21 de la matrice complexes sont calculés à partir des résultats de 6.2.4 selon:

$$T_{11}(\omega) = \frac{\sqrt{D_{11}(\omega)}}{\sqrt{D_{N11}(\omega)}} \text{Exp}(j\phi_{11}(\omega)) \text{ et } T_{21}(\omega) = \frac{\sqrt{D_{21}(\omega)}}{\sqrt{D_{N21}(\omega)}} \text{Exp}(j\phi_{21}(\omega)) \quad (\text{A.7})$$

De manière similaire, à partir des résultats pour le deuxième état d'entrée de polarisation, les éléments T_{12} et T_{22} de la matrice complexe sont calculés selon:

$$T_{12}(\omega) = \frac{\sqrt{D_{12}(\omega)}}{\sqrt{D_{N12}(\omega)}} \text{Exp}(j(\phi_{12}(\omega) + \pi)) \text{ et } T_{22}(\omega) = \frac{\sqrt{D_{22}(\omega)}}{\sqrt{D_{N22}(\omega)}} \text{Exp}(j\phi_{22}(\omega)) \quad (\text{A.8})$$

Noter que la phase de T_{12} est inversée ici avec le décalage de π , parce que la relation de phase par rapport au bras de référence de l'interféromètre au niveau des deux détecteurs est inversée pour le deuxième état d'entrée par rapport au premier, quand le montage de la Figure 2 est utilisé.

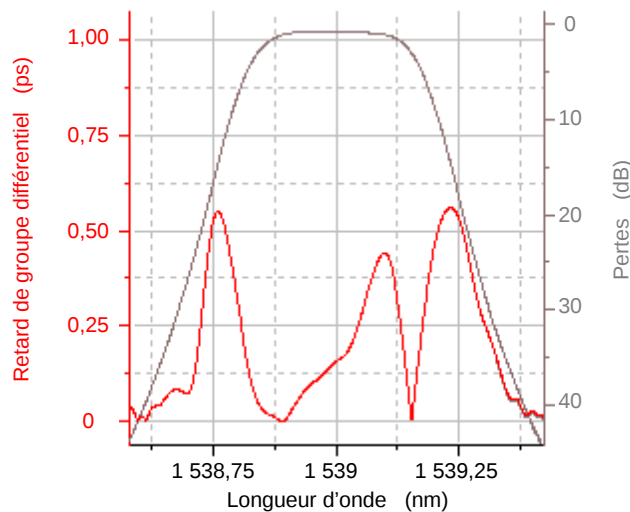
Ces éléments sont alors combinés à partir de la matrice $T(\omega)$:

$$\tilde{T} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \quad (\text{A.9})$$

Ensuite, les valeurs propres, ρ_1 et ρ_2 , sont trouvées pour $T(\omega_{n+1})T^{-1}(\omega_n)$, où ω_n et ω_{n+1} sont les fréquences optiques des points adjacents dans les spectres mesurés. Les valeurs de retard de groupe différentiel, $\Delta\tau$, moyennées respectivement sur l'intervalle allant de ω_n à ω_{n+1} , sont données pour chaque intervalle par:

$$\Delta\tau = \frac{\left| \text{Arg}\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \right|}{\omega_{n+1} - \omega_n} \quad (\text{A.10})$$

où $\text{Arg}()$ est la fonction argument, c'est-à-dire $\text{Arg}(ae^{i\varphi}) = \varphi$. De cette façon, le spectre du retard de groupe différentiel peut être généré pour la gamme mesurée. Un exemple est représenté à la Figure A.2 pour le même dispositif que sur la Figure 10.



IEC 1003/12

Figure A.2 – Spectre du retard de groupe différentiel pour un filtre passe-bande de 50 GHz, mesuré avec une largeur de bande de résolution de 30 pm

A.5 Calcul du retard de groupe différentiel à partir des mesures faites avec la méthode du déphasage par polarisation

La méthode du déphasage par polarisation est décrite en 5.3 et 6.3. Les paramètres suivants sont calculés en utilisant les valeurs mesurées en 6.3.3 et 6.3.4.

$$\begin{aligned}
 \bar{\alpha}_1 &= \frac{\Delta\Theta}{\Delta\omega} = \frac{\Delta\Theta}{2\pi \cdot \delta\lambda} \cdot \lambda_i \lambda_f \\
 \bar{\beta}_1 &= \frac{1}{4} \left(\frac{d\Phi_{11}}{d\omega} - \frac{d\Phi_{22}}{d\omega} - \frac{d\Phi_{21}}{d\omega} + \frac{d\Phi_{12}}{d\omega} \right) \\
 \bar{\gamma}_1 &= \frac{1}{4} \left(\frac{d\Phi_{11}}{d\omega} - \frac{d\Phi_{22}}{d\omega} + \frac{d\Phi_{21}}{d\omega} - \frac{d\Phi_{12}}{d\omega} \right) \\
 \Theta &= \frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\frac{|T_{11}|^2 - |T_{21}|^2}{|T_{11}|^2 + |T_{21}|^2} \right) \\
 \cos 2\Theta_0 &= \frac{|T_{11}|^2 - |T_{21}|^2}{|T_{11}|^2 + |T_{21}|^2}
 \end{aligned} \tag{A.11}$$

où

λ_i, λ_f sont la longueur d'onde initiale et la longueur d'onde finale de $\delta\lambda$

$$\begin{aligned}
 |T_{kl}|^2 &= \frac{|T_{kl}|_{\text{mea}}^2}{|T_{11}|_{\text{cal}}^2} & \frac{d\Phi_{kl}}{d\omega} &= \frac{d\Phi_{kl}}{d\omega}_{\text{mea}} - \frac{d\Phi_{11}}{d\omega}_{\text{cal}} & kl &= 11 \text{ et } 12 \\
 |T_{mn}|^2 &= \frac{|T_{mn}|_{\text{mea}}^2}{|T_{22}|_{\text{cal}}^2} & \frac{d\Phi_{mn}}{d\omega} &= \frac{d\Phi_{mn}}{d\omega}_{\text{mea}} - \frac{d\Phi_{22}}{d\omega}_{\text{cal}} & mn &= 21 \text{ et } 22
 \end{aligned} \tag{A.12}$$

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:

$$\text{DGD}(\lambda) = 2\sqrt{\bar{\alpha}_1^2 + \bar{\beta}_1^2 + \bar{\gamma}_1^2 + 2\bar{\beta}_1\bar{\gamma}_1\cos 2\Theta_0} \tag{A.13}$$

La technique de calcul peut aboutir à une série de valeurs du retard de groupe différentiel (DGD) en fonction de la longueur d'onde. Les Figures A.3 et A.4 représentent des exemples de telles caractéristiques.

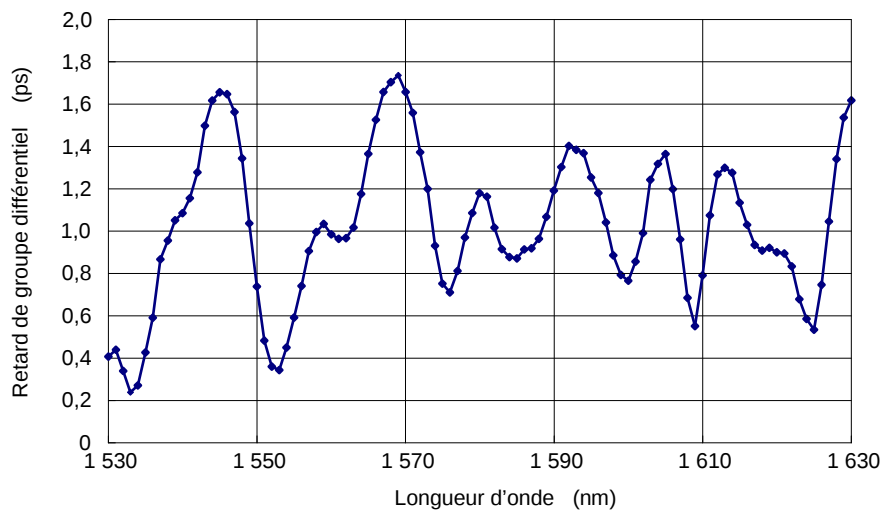


Figure A.3 – Retard de groupe différentiel (DGD) en fonction de la longueur d'onde pour un dispositif à couplage de mode de polarisation aléatoire (exemple)

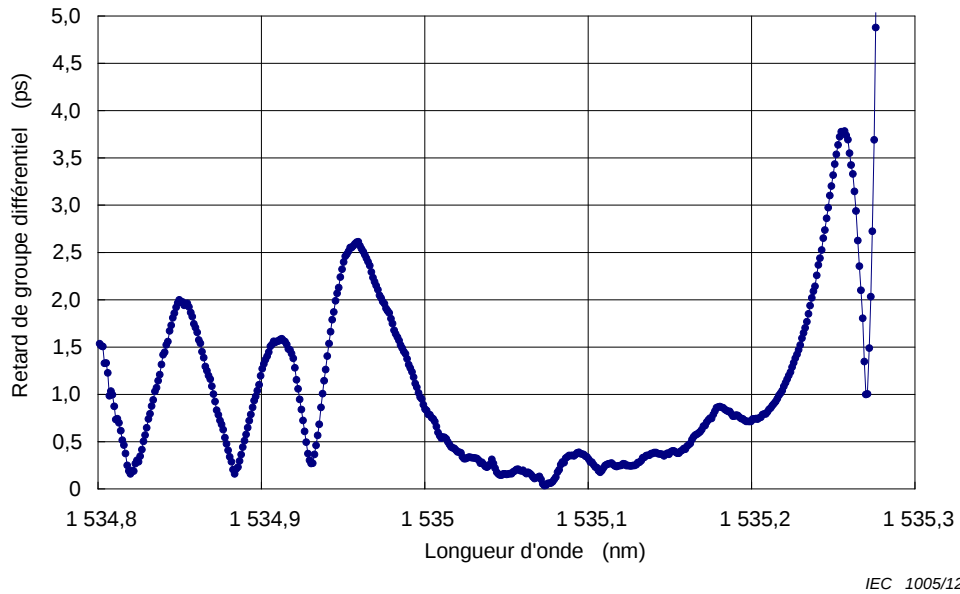


Figure A.4 – Retard de groupe différentiel (DGD) en fonction de la longueur d'onde pour un filtre à réseau de Bragg de fibres (exemple)

La dérivée du retard de groupe différentiel pour cette méthode est décrite ici, et est similaire à la méthode d'analyse des valeurs propres de la matrice de Jones. La matrice de la fonction de transfert optique peut être exprimée sous la forme:

$$\begin{aligned}
 T(\omega) &= \begin{bmatrix} |T_{11}| \times \exp(-j \Phi_{11}) & |T_{12}| \times \exp(-j \Phi_{12}) \\ |T_{21}| \times \exp(-j \Phi_{21}) & |T_{22}| \times \exp(-j \Phi_{22}) \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \Theta \times \exp(-j \phi - j \psi) & -\sin \Theta \times \exp(-j \phi + j \psi) \\ \sin \Theta \times \exp(+j \phi - j \psi) & \cos \Theta \times \exp(+j \phi + j \psi) \end{bmatrix} \times \exp(-j \Phi)
 \end{aligned} \tag{A.14}$$

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:

$$E^{\text{out}}(\omega) = T(\omega) \times E^{\text{in}}(\omega) \tag{A.15}$$

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:

$$E^{\text{out}}(\omega) = E^{\text{out}}(\omega_0) + \left. \frac{dE^{\text{out}}}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} \delta\omega + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2 E^{\text{out}}}{d\omega^2} \right|_{\omega=\omega_0} \delta\omega^2 \quad (\text{A.16})$$

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:

$$D(\omega) = \frac{dT(\omega)}{d\omega} \times T(\omega)^{-1} \quad (\text{A.17})$$

Ainsi, on obtient l'expression suivante en remplaçant A9 par A8.

$$\begin{aligned} E^{\text{out}}(\omega) &= \left\{ 1 + D\delta\omega + \frac{1}{2} D^2 \delta\omega^2 + \frac{1}{2} \frac{dD}{d\omega} \delta\omega^2 \right\} \times E^{\text{out}}(\omega_0) \\ &\cong \exp \left\{ D\delta\omega + \frac{1}{2} \frac{dD}{d\omega} \delta\omega^2 \right\} \times E^{\text{out}}(\omega_0) \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

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.

On obtient l'expression suivante en diagonalisant $D(\omega)$ avec l'opérateur unitaire X .

$$\begin{aligned} X^{-1} \times E^{\text{out}}(\omega) &= X^{-1} \exp(D \times \delta\omega) X \times X^{-1} E^{\text{out}}(\omega_0) \\ &= \begin{bmatrix} \exp(-j\Gamma_+ \times \delta\omega) & 0 \\ 0 & \exp(-j\Gamma_- \times \delta\omega) \end{bmatrix} \times X^{-1} E^{\text{out}}(\omega_0) \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

où $-j\Gamma_{+/-}$ sont les valeurs propres de $D(\omega)$ et Γ_+ , Γ_- sont le retard de groupe maximum et le retard de groupe minimum, respectivement.

C'est-à-dire, la différence entre les parties imaginaires des valeurs propres de $D(\omega)$, $\Gamma_+ - \Gamma_-$, est la dispersion de mode de polarisation du premier ordre appelée retard de groupe différentiel.

Les quatre paramètres indépendants Θ , ϕ , ψ et Φ décrits dans l'expression A.14 donnent l'expression suivant en utilisant le développement en série de Taylor.

$$\begin{aligned} \Theta &= \Theta_0 + \bar{\alpha}_1 \delta\omega + \frac{1}{2} \bar{\alpha}_2 \delta\omega^2 \\ \phi &= \phi_0 + \bar{\beta}_1 \delta\omega + \frac{1}{2} \bar{\beta}_2 \delta\omega^2 \\ \psi &= \psi_0 + \bar{\gamma}_1 \delta\omega + \frac{1}{2} \bar{\gamma}_2 \delta\omega^2 \\ \Phi &= \Phi_0 + \beta_1 \delta\omega + \frac{1}{2} \beta_2 \delta\omega^2 \end{aligned} \quad (\text{A.20})$$

où

$$\delta\omega = \omega - \omega_c$$

Θ_0 , ϕ_0 , ψ_0 , Φ_0 sont les valeurs de Θ , ϕ , ψ , Φ à $\omega - \omega_c = 0$

$\alpha_1, \bar{\beta}_1, \bar{\gamma}_1, \beta_1$ 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'expression A.20 comme suit:

$$D(\omega) = -j\beta_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - j \begin{bmatrix} \bar{\beta}_1 + \bar{\gamma}_1 \cos 2\Theta & (-j\bar{\alpha}_1 + \bar{\gamma}_1 \sin 2\Theta) \times e^{-j2\phi} \\ (+j\bar{\alpha}_1 + \bar{\gamma}_1 \sin 2\Theta) \times e^{+j2\phi} & -\bar{\beta}_1 - \bar{\gamma}_1 \cos 2\Theta \end{bmatrix} \quad (\text{A.21})$$

Ainsi, les valeurs propres de $D(\omega)$ sont exprimées sous la forme:

$$j\Gamma_{\pm} = -j\beta_1 \pm j\sqrt{\bar{\alpha}_1^2 + \bar{\beta}_1^2 + \bar{\gamma}_1^2 + 2\bar{\beta}_1\bar{\gamma}_1 \cos 2\Theta} \quad (\text{A.22})$$

où β_1 est le retard de groupe indépendant de la polarisation.

Le retard de groupe différentiel $\Delta\tau$ est donné par la différence entre les parties imaginaires des deux valeurs propres sous la forme:

$$\Delta\tau = \Gamma_+ - \Gamma_- = 2\sqrt{\bar{\alpha}_1^2 + \bar{\beta}_1^2 + \bar{\gamma}_1^2 + 2\bar{\beta}_1\bar{\gamma}_1 \cos 2\Theta} \quad (\text{A.23})$$

La valeur de la PMD dans la plage de longueurs d'onde est donnée par la valeur moyenne du retard de groupe différentiel (DGD) sur la plage de longueurs d'onde mesurées.

Bibliographie

CEI 60793-1-42, *Fibres optiques – Partie 1-42: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Dispersion chromatique*

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

CEI 61300-1, *Dispositifs d'interconnexion et composants passifs à fibres optiques – Procédures fondamentales d'essais et de mesures – Partie 1: Généralités et lignes directrices*

CEI 61300-3-1, *Dispositifs d'interconnexion et composants passifs à fibres optiques – Méthodes fondamentales d'essais et de mesures – Partie 3-1: Examens et mesures – Examen visuel*

CEI 61300-3-32, *Dispositifs d'interconnexion et composants passifs à fibres optiques – Méthodes fondamentales d'essais et de mesures – Partie 3-32: Examens et mesures – Mesure de la dispersion de mode de polarisation pour composants optiques passifs*

CEI/TR 62343-6-3, *Dynamic Modules – Round robin measurement results for group delay ripple of tunable dispersion compensators* (disponible uniquement en anglais)

Frederick W. King, *Hilbert Transforms: Volume 1 (Encyclopedia of Mathematics and its Applications)* (disponible uniquement en anglais)

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch