

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Optical fibres –

Part 1-49: Measurement methods and test procedures – Differential mode delay

Fibres optiques –

Partie 1-49: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Retard différentiel de mode

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60793-1-49:2018



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2018 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

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

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 21 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

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

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

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

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

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

Recherche de publications IEC - webstore.iec.ch/advsearchform

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 21 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Optical fibres –

Part 1-49: Measurement methods and test procedures – Differential mode delay

Fibres optiques –

Partie 1-49: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Retard différentiel de mode

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 33.180.10

ISBN 978-2-8322-5954-2

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.....	4
1 Scope.....	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	7
4 Apparatus.....	8
4.1 Overview.....	8
4.2 Optical source.....	9
4.3 Probe fibre.....	10
4.4 Scanning stage.....	10
4.5 Probe to test sample coupling.....	10
4.6 Cladding mode stripper.....	10
4.7 Detection system.....	10
4.8 Sampler and digitizer.....	11
4.9 Computational equipment.....	11
4.10 System performance.....	11
4.10.1 General.....	11
4.10.2 Pulse temporal stability.....	12
4.10.3 System stability frequency limit (<i>SSFL</i>).....	12
5 Sampling and specimens.....	13
5.1 Test sample.....	13
5.2 Specimen end-faces.....	13
5.3 Specimen length.....	13
5.4 Specimen deployment.....	13
5.5 Specimen positioning.....	13
6 Procedure.....	13
6.1 Fibre coupling and system setup.....	13
6.2 Determination of centre.....	14
6.3 Measurement of the test sample.....	14
6.3.1 Selection of radii and quadrant.....	14
6.3.2 Collection of scan data.....	14
6.4 Determination of ΔT_{PULSE} and ΔT_{REF}	14
6.5 Reference test method.....	14
7 Calculations and interpretation of results.....	15
7.1 General.....	15
7.2 Differential mode delay (<i>DMD</i>).....	15
7.2.1 General.....	15
7.2.2 Deconvolution.....	15
7.2.3 Pulse folding.....	15
7.2.4 Determination of <i>DMD</i>	16
7.3 Minimum calculated effective modal bandwidth.....	17
7.3.1 General.....	17
7.3.2 Time domain pulse computation.....	17
7.3.3 Calculate the transfer function.....	18
7.3.4 Compute the power spectrum.....	18
7.3.5 Compute EMB_C and $minEMB_C$	18
7.4 Length normalization.....	18

8	Documentation	18
8.1	Information to be reported	18
8.2	Information available upon request	19
9	Specification information	19
	Annex A (normative) Source spectral width limitation	20
A.1	Limiting the effect of chromatic dispersion (CD) on the value of <i>DMD</i>	20
A.1.1	General	20
A.1.2	Limit CD contribution to <i>DMD</i> to be measured	20
A.1.3	Limit CD contribution to reference width	20
A.1.4	Adjust ΔT_{REF} to account for CD contribution	21
A.1.5	High-performance <i>DMD</i> fibres and spectral requirements	21
A.2	Chromatic dispersion in multimode fibres	22
	Annex B (informative) Determination of fibre optical centre	23
B.1	General	23
B.2	Method	23
	Annex C (normative) Detection system modal measurement	26
C.1	General	26
C.2	Determination of coupling function	26
C.2.1	Overview	26
C.2.2	Fibre sample and coupling	26
C.2.3	Detector response	26
C.2.4	Reference response	27
C.2.5	Coupling function determination	28
	Annex D (informative) Discussion of measurement details	29
D.1	<i>DMD</i>	29
D.2	<i>EMB_C</i> calculation	30
	Annex E (informative) Determining <i>DMD</i> weightings for <i>EMB_C</i> calculation	33
E.1	Selecting a set of weightings	33
E.2	Procedure for generating <i>DMD</i> weightings given encircled flux data	33
	Annex F (informative) <i>EMB_C</i> calculation information	35
F.1	Default <i>DMD</i> weightings for transmitters conforming to IEC 60793-2-10	35
F.2	Example method to determine if an adjusted bandwidth (BW) metric is adequate	36
	Bibliography	38
	Figure 1 – Example apparatus	9
	Figure B.1 – Typical area data from centring waveforms	24
	Figure D.1 – Idealized <i>DMD</i> data	29
	Table A.1 – Worst-case chromatic dispersion	22
	Table C.1 – Theoretical normalized coupling efficiency	27
	Table F.1 – <i>DMD</i> weightings	35
	Table F.2 – <i>DMD</i> weightings	36

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

OPTICAL FIBRES –

**Part 1-49: Measurement methods and test procedures –
Differential mode delay**

FOREWORD

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

International Standard IEC 60793-1-49 has been prepared by subcommittee 86A: Fibres and cables, of IEC technical committee 86: Fibre optics.

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

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

- a) better alignment with original intent by filling some omissions and therefore improving measurement rigor;

- b) the measurement of fibres with smaller differential mode delay (and higher modal bandwidth) such as type A1a.3 fibres of IEC 60793-2-10 [1]¹ that are used in constructing OM4 performance category cables; new requirements on specifying detector amplitude and temporal response, specimen deployment conditions, four-quadrant scanning, and uniformity of radial locations for calculating bandwidth.

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

CDV	Report on voting
86A/1812/CDV	86A/1860/RVC

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

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

This International Standard is to be used in conjunction with IEC 60793-1-49:2017.

A list of all parts in the IEC 60793 series, published under the general title *Optical fibres*, can be found on the IEC website.

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

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

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

OPTICAL FIBRES –

Part 1-49: Measurement methods and test procedures – Differential mode delay

1 Scope

This part of IEC 60793 applies only to multimode, graded-index glass-core (category A1) fibres. The test method is commonly used in production and research facilities, but is not easily accomplished in the field.

This document describes a method for characterizing the modal structure of a graded-index multimode fibre. This information is useful for assessing the bandwidth performance of a fibre especially when the fibre is intended to support a range of launch conditions, for example, those produced by standardized laser transmitters.

With this method, the output from a probe fibre that is single-moded at the test wavelength excites the multimode fibre under test. The probe spot is scanned across the end-face of the fibre under test at specified radial positions, and a set of response pulses are acquired at these positions.

Three specifiable parameters can be derived from the collected set of data.

- The first parameter, differential modal delay (DMD), is the difference in optical pulse delay time between the fastest and slowest mode groups of the fibre under test. DMD specifications place limits on modal delay over a specified range of probe fibre radial offset positions. DMD specifications are determined by modeling and experimentation to correspond to a minimum effective modal bandwidth (EMB) for the expected range of transmitters used in a link at a given performance level.
- The second specifiable parameter is derived by combining the pulses using sets of specific radial weights to determine an approximation of a set of pulses from typical transmitters. Using Fourier transforms, the calculated effective modal bandwidth (EMB_c) is determined for each weight set. The minimum of these EMB_c values ($minEMB_c$) is the specifiable parameter.
- The third specifiable parameter, the computed overfilled launch bandwidth, OMB_c , is determined in a manner similar to EMB_c , but by applying just one weight set to the set of pulses; this weight set corresponds to the overfilling condition, where all mode groups are equally excited.

The test's intent is to quantify the effects of interactions of the fibre modal structure and the source modal characteristics excluding the source's spectral interaction with fibre chromatic dispersion. Adding the effects of fibre chromatic dispersion and the source spectral characteristics will reduce the overall transmission bandwidth, but this is a separate calculation in most transmission models. In this test, the contribution of chromatic dispersion is controlled by limiting the spectral width of usable test sources. Practical test sources will have non-zero spectral width and will thus slightly distort the DMD , $minEMB_c$ and OMB_c values. These chromatic dispersion effects are considered in Annex A.

NOTE Comparison between IEC 60793-1-49 and ITU recommendations: ITU-T Recommendation G.650.1 [2] contains no information on how to measure the DMD of a graded-index multimode fibre.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition

cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60793-1-1:2017, *Optical fibres – Part 1-1: Measurement methods and test procedures – General and guidance*

IEC 60793-1-22, *Optical fibres – Part 1-22: Measurement methods and test procedures – Length measurement*

IEC 60793-1-41, *Optical fibres – Part 1-41: Measurement methods and test procedures – Bandwidth*

IEC 60793-1-45, *Optical fibres – Part 1-45: Measurement methods and test procedures – Mode field diameter*

IEC 60825-1, *Safety of laser products – Part 1: Equipment classification and requirements*

IEC 60825-2, *Safety of laser products – Part 2: Safety of optical fibre communication systems (OFCS)*

IEC 61280-1-4, *Fibre optic communication subsystem test procedures – Part 1-4: General communication subsystems – Light source encircled flux measurement method*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

3.1

maximum *DMD*

maximum *DMD* occurring between the outer (R_{OUTER}) and inner (R_{INNER}) limits of radial offset position over which the probe spot is scanned for one or more sets of R_{OUTER} and R_{INNER}

3.2

minimum EMB_c

$minEMB_c$

minimum EMB_c among the EMB_c values calculated from a sequence of *DMD* weightings

Note 1 to entry: The user of this document may also specify the calculated overfilled modal bandwidth (OMB_c).

3.3

differential mode delay

DMD

estimated difference in optical pulse delay time between the fastest and slowest modes excited for all radial offset positions between and including R_{INNER} and R_{OUTER}

Note 1 to entry: This note applies to the French language only.

3.4 effective modal bandwidth

EMB

bandwidth associated with the transfer function, $H(f)$, of a particular laser/fibre combination

Note 1 to entry: This note applies to the French language only.

3.5 calculated overfilled modal bandwidth

OMB_c

bandwidth associated with the transfer function, $H(f)$, when the fibre is overfilled

3.6 quadrant

radial section at one of four possible azimuthal angles over which a radial set of pulse data can be collected

Note 1 to entry: For example, a radial section may be taken from one of the sets x -positive, x -negative, y -positive or y -negative.

3.7 mode field diameter

MFD

diameter of the mode emanating from the end-face of a single-mode fibre, as determined by IEC 60793-1-45

Note 1 to entry: This note applies to the French language only.

3.8 reference test method

RTM

test method in which a given characteristic of a specified class of optical fibres or optical cables (and associated components) is measured strictly according to the definition of this characteristic, and which gives results that are accurate, reproducible and relatable to practical use

Note 1 to entry: This note applies to the French language only.

3.9 full width quarter maximum

FWQM

full width at 25 % of maximum amplitude of an optical pulse

Note 1 to entry: This note applies to the French language only.

4 Apparatus

4.1 Overview

The apparatus shall provide a means to inject and detect short-duration pulses of light of a small spot size launched into known locations of the core of the multimode fibre to be measured. An example is diagrammed in Figure 1.

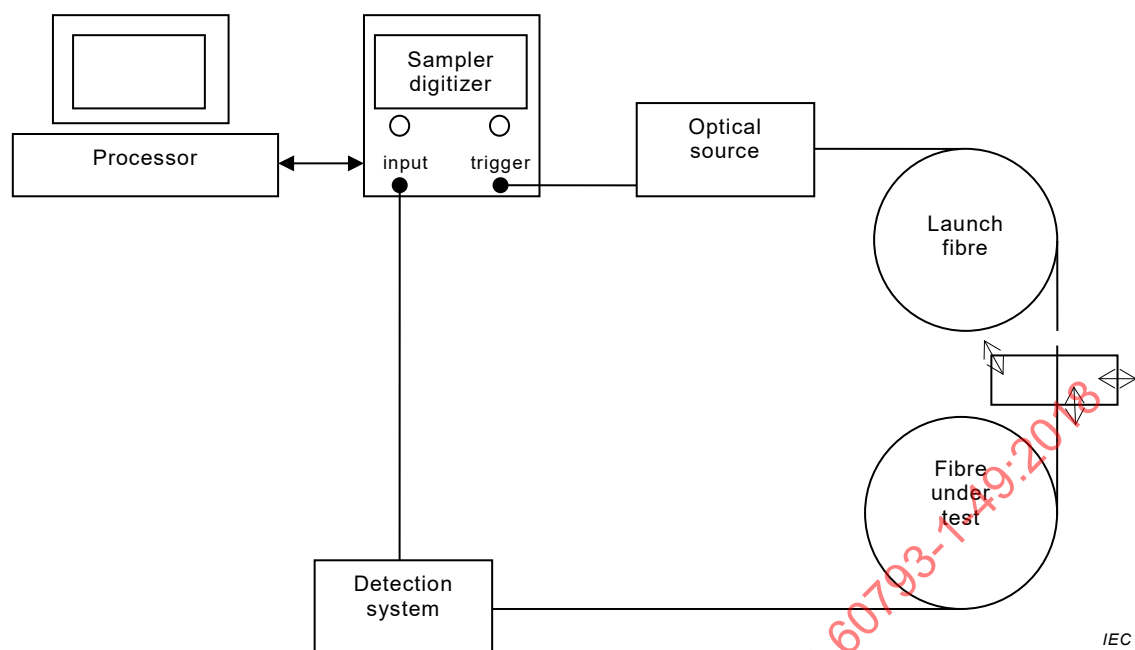


Figure 1 – Example apparatus

4.2 Optical source

Use an optical source that introduces short duration, narrow spectral width pulses into the probe fibre.

The temporal duration of the optical pulse shall be short enough to measure the intended differential delay time. The maximum duration allowed for the optical pulse, characterized as full width at 25 % of maximum amplitude (*FWQM*), will depend both on the value of *DMD* to be determined and the sample length. For example, if the desired length-normalized *DMD* limit is 0,20 ps/m over a sample of length 500 m, the *DMD* to be measured is 100 ps, so the maximum allowable *FWQM* of the probe pulse is ~110 ps. Testing to the same *DMD* limit in a 10 000 m length of fibre requires measuring a *DMD* of 2 000 ps, therefore a pulse as wide as ~2 200 ps may be used. Detailed limits are given in 6.1, and may depend on the source spectral width.

Source spectral width shall meet the requirements of Annex A. Chromatic dispersion induced broadening resulting from source spectral width is limited through the methodologies described in Annex A. The requirement on spectral width may be met either by using a spectrally narrow source, or alternatively by the use of appropriate optical filtering at either the source or detection end. This requirement is challenging when measuring the highest performance fibres (whose *DMD* can be as low as 0,1 ps/m). In these circumstances, the pulse source's spectrum may be transform limited, in which case, no improvement can be made.

The source centre wavelength requirement is given by the product specification documents, which may require measurements at more than one wavelength. Each wavelength is considered in this document as a single measurement (if no default wavelength specification is defined for the product to be measured, the default of 850 nm ± 10 nm shall be used).

A mode-locked titanium-sapphire laser, pulsed semiconductor laser or mode-locked fibre laser are examples of sources suitable for this application.

Reference shall be made to IEC 60825-1 and to IEC 60825-2 for an explanation of the safe usage of these sources.

4.3 Probe fibre

The optical source shall be coupled to a fibre which is single-moded at the wavelength of measurement. It is required that this fibre be nominally of step-index design, and so shall have a mode field diameter (*MFD*) satisfying the following equation:

$$MFD = (8,7\lambda - 2,39) \pm 0,5 \mu\text{m} \quad (1)$$

where

λ is the source wavelength in μm ;

and the mode field diameter is determined using IEC 60793-1-45.

This equation produces a mode field diameter of 5 μm at 850 nm and 9 μm at 1 310 nm, which corresponds to commercially available single-mode fibres.

Ensure that the output of the probe fibre is single-moded by limiting the ability for higher-order modes to propagate. Winding the probe fibre around a mandrel of a given diameter is an example mode control device; a common example is three turns around a 25 mm diameter mandrel.

4.4 Scanning stage

Either the probe fibre or the test sample shall be mounted to a scanning stage capable of scanning the test sample relative to the probe fibre over the entire diameter of the test sample's core in both x - and y -direction. The scanning stage x - and y -actuators shall be capable of positioning the probe fibre to within 0,5 μm of the desired position. Often, the scanning stage is used to adjust the gap between the probe fibre and the test sample's end-face or, when an optical system is employed, to focus the probe spot image onto the sample end-face.

The probe fibre output beam's angle of propagation shall be aligned with the test sample's axis of propagation to within 1°.

The apparatus shall employ algorithms to reproducibly centre (with respect to the test sample's core) the output spot of the probe fibre to within $\pm 1,0 \mu\text{m}$. Refer to Annex B for a discussion of end-face centring.

4.5 Probe to test sample coupling

If directly coupled to the test sample, the gap between the output end of the probe fibre and the end-face of the test sample shall be no more than 10 μm . Alternatively, a free-space optics system of lenses or mirrors may be used to image the output spot of the probe fibre onto the end-face of the test sample. When optics are employed, it is required that at each radial scan position of the measurement, substantially the same modes are excited in the test fibre as would be if the beam were coupled directly from the output of the single-mode probe fibre.

4.6 Cladding mode stripper

A cladding mode stripper provides means to remove cladding light from the test sample. Often, the fibre coating is sufficient to perform this function. Otherwise, use cladding mode strippers near both ends of the test sample. If the fibre is retained on the cladding mode stripper(s) with small weights, care shall be taken to avoid microbending at these sites.

4.7 Detection system

Use an optical detection apparatus suitable for the test wavelength. The detection apparatus shall couple all of the guided modes from the test sample onto the detector's active area.

Amplifiers and signal conditioning electronics may be employed, but typically biased PIN photodetectors or avalanche-mode photodiodes are employed which are coupled directly to the electronics of the sampling system. The detector, in combination with any amplifiers and other electronics, shall have a combined amplitude nonlinearity no greater than 5 % over the expected range of signals. Ringing of the detector system shall be limited such that maximum overshoot or undershoot be less than 5 % of the peak amplitude of the detected optical signal as measured on the reference pulse.

These detection systems may exhibit modally dependent amplitude responses. The determination of *DMD* depends little on this modal response error since each pulse's relative amplitude is used to determine the location of its leading and trailing edges. However, the determination of *EMB_c* and *OMB_c* (defined in IEC 60793-1-41) rely on the pulse amplitudes in relation to all the pulses in the data set, so a modally dependent detector can distort these measurements. Annex C describes a method for qualifying modally dependent detectors by scanning the detector's spatial uniformity and computing a coupling function, $C(r)$. It is required that the detector's coupling function satisfy $0,9 \leq C(r) \leq 1,1$ over the range of radii to be measured.

4.8 Sampler and digitizer

The waveform of the detected optical signal shall be recorded and displayed on a suitable instrument, such as a high-speed sampling oscilloscope with calibrated time sweep. The recording system should be capable of averaging the detected waveform for multiple optical pulses.

Use a delay device, such as a digital delay generator, to provide a means of triggering the detection electronics at the correct time. The delay device may trigger the optical source or be triggered by it. The delay device may be an integral part of the recording instrument or it may be an external device.

When averaging is employed to improve the signal-to-noise ratio (*SNR*) of the measurement, pulse-to-trigger jitter or wander statistics may affect the measurement in various ways. For example, if significant high-frequency jitter is present, averaging several pulses will effectively widen the probe pulse, and the jitter statistics may be dependent on the amount of delay employed; the averaging scheme shall be consistent when measuring the reference pulse and the scanned pulses so that the effective reference pulse remains constant. Some delay systems have difficult jitter statistics and attention shall be paid to these effects to ensure good measurements.

4.9 Computational equipment

This test method generally requires a computer to automate the procedure, including the control of the scanning stage and waveform acquisition, storage of the intermediate data and calculation of the results.

4.10 System performance

4.10.1 General

The stability of the system in both the temporal and frequency domains is critical to ensure valid, repeatable measurements. Subclause 4.10 defines a characterization process that shall be performed when a measurement system is commissioned, serviced and checked at regular intervals to ensure the measurement system is performing as expected. Both tests begin by coupling the output of the probe fibre into the detection apparatus and adjusting the signal level and time base. Each shares the following common steps:

- Couple the pulse directly into the detection apparatus using one of these three methods:
 - the probe fibre can be coupled directly to the detection apparatus.

- the probe fibre's output can be coupled by using a short length of fibre (< 10 m of the same type fibre as the test fibre) mounted between the launch system and the detection system.
- the probe output can be coupled to the detector via a system of lenses and mirrors.
- Adjust the amplitude of the optical pulse to ensure good *SNR* without causing signal compression in the receiver.
- Adjust the sampling window of the detection system to match the smallest time window used to acquire data from the expected range of test samples. Ensure the entire pulse is captured and the Nyquist limit is not violated.

These characterizations test the system stability to ensure the system's suitability for measurement. Each characterization should be performed over a time interval, T , which should be no shorter than the time required to perform a four-quadrant measurement at 1 μm intervals at maximum averaging. Over T , several reference pulse waveforms are acquired, and, computing intermediate results, the particular stability parameter is characterized. The number of waveforms taken over the time interval, T , should be approximately the number of waveforms in a four-quadrant scan of 1 μm intervals (i.e., 102 samples for a 50 μm fibre).

4.10.2 Pulse temporal stability

This test characterizes the system's temporal limits and stability.

At each time t , record the 25 % width ($FWQM$) using linear interpolation to improve precision. Record $FWQM$ as a function of time over T . Determine the temporal stability parameter, $\Delta FWQM_{\text{stab}}$:

$$\Delta FWQM_{\text{stab}} = 100 \times \frac{FWQM_{\text{MAX}} - FWQM_{\text{MIN}}}{\overline{FWQM}} \quad (2)$$

where

$\overline{FWQM}$ is the average $FWQM$ over the interval.

$\Delta FWQM_{\text{stab}}$ shall be less than 5 % to satisfy the temporal stability requirement. If $\Delta FWQM_{\text{stab}}$ lies outside this range, the system is disqualified.

4.10.3 System stability frequency limit (SSFL)

Define

$$G_{\text{ref}}(f) = \frac{\text{FT}(R(t))}{\text{FT}(R_0(t))} \quad (3)$$

where

R_0 is a reference pulse taken at the beginning of the characterization;

R is any subsequent reference pulse;

FT means Fourier transform.

At each t , record R and compute G_{ref} and then, for that time t , record $F_{\text{MAX}}(t)$ as the lowest frequency where $|G(f)|$ exceeds $1,0 \pm 0,05$. Over the complete interval, record the minimum of the set of $F_{\text{MAX}}(t)$ as the system's *SSFL*.

Both R and R_0 should be acquired with enough averaging to reduce the noise of the ratio to be less than 1 % over the frequency range of interest.

If the calculated $\min EMB_c$ or OMB_c for a fibre/laser combination exceeds the $SSFL$, report the normalized bandwidth value as greater than $SSFL$ multiplied by the length.

5 Sampling and specimens

5.1 Test sample

The test sample shall be graded-index glass-core (category A1) multimode fibre.

5.2 Specimen end-faces

Prepare flat end-faces at the input and output ends of the specimen. The quality of the input end-face is critical; they shall have end angles no greater than $1,5^\circ$.

5.3 Specimen length

The length of the fibre shall be measured using IEC 60793-1-22. The length of the sample shall be known to ± 1 %. To resolve disputes, the reference test length shall be specified by the product specification.

5.4 Specimen deployment

Support the test fibre in a manner that relieves tension and minimizes microbending, such as on a measurement spool having a minimum radius of 150 mm that imparts less than 5 g of fibre tension. Deployment shall not impart macrobends of radius less than 40 mm.

The thermal stability of the specimen shall meet the required measurement precision. This requirement can be quite demanding for high performance fibres. The thermal coefficient of optical transit time for these fibres is approximately $0,035 \text{ ps/m}\cdot\text{K}$. If the sample undergoes a 3 K temperature change during the time of measurement, the error will be $0,1 \text{ ps/m}$, which subsumes the entire specification for high-performance fibres.

5.5 Specimen positioning

Position the input end of the test sample such that it is aligned to the output end of the probe fibre as described in 4.3.

Position the output end of the test sample such that it is aligned with the detection system, as described in 6.2 (careful centring is part of the measurement procedure below).

6 Procedure

6.1 Fibre coupling and system setup

Launch the light from the probe fibre into the test fibre. Adjust the time scale and trigger delay of the detection system such that, for all relevant radial offsets of the probe spot, the pulses are completely contained inside the digitisation window ("contained" means that all leading and trailing edges having amplitude greater than or equal to 1 % of the peak amplitude are inside the window). All data from the test fibre shall be obtained without further adjustment of the delay and time scale. The reference pulse acquisition may use a different amount of delay, but shall use the same time scale.

6.2 Determination of centre

Find the centre of the optical axis of the test fibre with respect to the probe fibre. Refer to Annex B for suggested approaches to determine the fibre's centre.

6.3 Measurement of the test sample

6.3.1 Selection of radii and quadrant

The selection of radii and quadrant is determined by two considerations: measurement efficiency and how the data set is to be used. When *DMD* masks are applied to the data, it is required that the endpoint radii of all masks be included in the radial points scanned. In no case, for either *DMD* or *EMB_c*, can the radial spacing be greater than 2 µm between adjacent radii. The reference test method (see 6.5) requires the radial spacing be nominally 1 µm.

One or more quadrants may be scanned. The reference test method (see 6.5) requires that all four quadrants (+*x*, −*x*, +*y* and −*y*) be scanned. The data from each quadrant shall be combined to produce the computed results as outlined in Clause 7.

The radial point at the centre (0 µm) needs to be scanned just once (this position is quadrant-independent). However, if scanned more than once (for example once on the *x*-axis and once on the *y*-axis), these independent scans can be used to check for measurement impairments, such as system drift or temperature-induced changes in the effective fibre length. Comparing waveforms at the same radius in different quadrants can aid in detecting sample preparation impairments such as poor cleaves or macrobending, or fibre imperfections, such as profile distortion.

6.3.2 Collection of scan data

Measure and record the response of the test sample, $u(q, r, t)$, in the selected set of quadrants, *q*, at the selected radial offsets, *r*, as a function of time, *t*, by scanning the probe spot across the fibre end-face and collecting the associated time domain waveform. Averaging may be employed to improve the *SNR*.

6.4 Determination of ΔT_{PULSE} and ΔT_{REF}

Couple the pulse directly into the detection apparatus using one of the three methods described: the probe fibre can be coupled directly to the detection apparatus, or the probe fibre's output can be coupled by using a short length of fibre (< 10 m of the same type fibre as the test fibre) mounted between the launch system and the detection system, or the probe can be coupled to the detector via a system of lenses and mirrors.

Measure the waveform of the optical pulse, and record it as $u_{\text{ref}}(t)$. Determine the temporal width of $u_{\text{ref}}(t)$ at 25 % of the peak amplitude, and record it as ΔT_{PULSE} . Linear interpolation shall be used between successive time points to calculate ΔT_{PULSE} for improved precision.

Use Annex A to calculate a value of ΔT_{REF} appropriate for the values of ΔT_{PULSE} , source spectral width and fibre chromatic dispersion.

When acquiring the reference pulse, ensure that the sampling system's time scale is the same as the scale used when the test sample was acquired.

6.5 Reference test method

The reference test method shall consist of a complete four quadrant scan at 1 µm intervals on a fibre sample length specified by the product specification.

7 Calculations and interpretation of results

7.1 General

The minimum effective modal bandwidth (*EMB*) of a fibre is the minimum bandwidth corresponding to excitation from transmitters conforming to defined launch conditions. For example, the minimum *EMB* specified in IEC 60793-2-10 is applicable to launch conditions specified in IEC 60793-2-10. The minimum *EMB* is determined by calculating either the *DMD* or the minimum calculated *EMB* (EMB_c). The purpose of either calculation is to ensure that the *EMB* of the fibre will exceed the requirement for any mode power distribution (*MPD*) consistent with the *MPD* of conforming transmitters. The conformance of the transmitters may be defined, for example, by encircled flux requirements such as those found in IEC 60793-2-10 as measured according to IEC 61280-1-4.

7.2 Differential mode delay (*DMD*)

7.2.1 General

Differential modal delay is specified by one or more mask sets specified in the product specification. These masks generally take one of two forms: a fixed mask that specifies a minimum and maximum radius over which the edges are taken, or a sliding mask that specifies a radial width and a starting and ending point over which the mask is to be considered; as the mask is moved across the range, the pulse width analysis is performed and, in the end, the worst-case *DMD* is taken as the reported value.

7.2.2 Deconvolution

Deconvolving the reference pulse from the pulses in the scanning set is allowed, but optional.

Deconvolution takes the following form:

$$u'(q,r,t) = FT^{-1} \left[\frac{FT[u(q,r,t)]}{FT[u_{ref}(t)]} FT[f(t)] \right] \quad (4)$$

where

$u(q,r,t)$ is the waveform taken from the sample in quadrant q at radius r ;

u_{ref} is the reference waveform;

f is some filtering function (i.e. a Gaussian of similar width to ΔT_{PULSE}).

To utilize deconvolution, the algorithm shall not introduce significant error for the pulse shapes encountered in the measurement, especially arising from the choice of a high-frequency noise filter, f . This process essentially replaces the reference pulse with the output filtering function's time domain representation, and after deconvolution ΔT_{PULSE} becomes the 25 % full-width of the filtering function. While marginal reductions in pulse width can be realized by this approach, this technique should, in general, only be considered to improve other characteristics of the source pulse shape, for example ringing or significant asymmetries. Note also that good detector linearity is required.

As a rule, deconvolution is not required, and when it is not employed, then $u'(q,r,t) = u(q,r,t)$.

7.2.3 Pulse folding

When more than one quadrant is measured, the waveforms at equivalent radii from each quadrant shall be combined to produce an average radial waveform:

$$u'(r,t) = \frac{\sum_Q u'(q,r,t)}{N(r)} \quad (5)$$

where the summation on Q means combine by summation, point-by-point with respect to time, t , each waveform from all quadrants, q , at radius r .

Waveforms of different quadrants shall be considered to be at the same radius if the absolute value of the difference of their radii is less than 0,5 μm (also noting that radius is always a positive quantity).

The division by $N(r)$ in Equation (5) recognizes that, for any radius r , there may be a different number of waveforms to be averaged, as is often the case at radius zero.

When only one quadrant is scanned, $u'(r,t) = u'(q,r,t)$.

7.2.4 Determination of *DMD*

The product specification will require that the *DMD* be determined for a given set of radial masks. The details of these masks are outside of the scope of this measurement method, but generally these masks specify that the *DMD* is determined by finding the pulse extent over a window specified at an inner and outer radii, R_{INNER} and R_{OUTER} . The remaining discussion describes the procedure for determination of *DMD* for one mask. To consider multiple masks, the procedure is repeated.

From the waveform set $u'(r,t)$, determine the set of leading and trailing edges of each waveform as a function of radius.

- 1) For each waveform, determine the edge threshold, $E(r)$, at 25 % of the maximum value of the waveform at that radius:

$$E(r) = 0,25 \times \text{MAX}(u'(r,t)) \quad (6)$$

- 2) Next, determine the fast edge and slow edge of each radial waveform, $T_{\text{FAST}}(r)$ and $T_{\text{SLOW}}(r)$, respectively. $T_{\text{FAST}}(r)$ is the earliest time at which the waveform $u'(r,t)$ rises to cross $E(r)$, and $T_{\text{SLOW}}(r)$ is the latest time that $u'(r,t)$ falls below $E(r)$. Interpolation shall be used to determine precise values of $T_{\text{FAST}}(r)$ and $T_{\text{SLOW}}(r)$.

Consider the subset of $u'(r,t)$ where r satisfies the constraint:

$$R_{\text{INNER}} - 0,25 \leq r \leq R_{\text{OUTER}} + 0,25 \quad (7)$$

DMD is determined by finding the fastest and slowest edges at each radii within the constraint of Equation (7):

$$\begin{aligned} T_{\text{FASTEST}} &= \text{MIN}[T_{\text{FAST}}(r)]_{R_{\text{INNER}}}^{R_{\text{OUTER}}} \\ T_{\text{SLOWEST}} &= \text{MAX}[T_{\text{SLOW}}(r)]_{R_{\text{INNER}}}^{R_{\text{OUTER}}} \end{aligned} \quad (8)$$

To determine the *DMD* using a mask bounded by a given R_{MIN} and R_{MAX} , the following requirement shall be satisfied: there exists a waveform, $u'(r,t)$, at r such that

$$R_{\text{MIN}} - 0,25 \leq r \leq R_{\text{MIN}} + 0,25 \quad (9)$$

and there exists some r_{MAX} in the data set such that

$$R_{\text{MAX}} - 0,25 \leq r_{\text{MAX}} \leq R_{\text{MAX}} + 0,25 \quad (10)$$

The *DMD* for the fibre sample and the specified fixed mask is:

$$DMD = T_{\text{SLOWEST}} - T_{\text{FASTEST}} - \Delta T_{\text{REF}} \quad (11)$$

If the computed *DMD* does not satisfy the inequality

$$DMD \geq 0,9 \times \Delta T_{\text{REF}} \quad (12)$$

then the *DMD* value shall be reported explicitly as less than $0,9 \times \Delta T_{\text{REF}}$.

7.3 Minimum calculated effective modal bandwidth

7.3.1 General

The parameter minimum EMB_c is intended to represent the fibre-contributed modal impairment in a communication link design considering a representative range of transmitter launch conditions. Refer to Annex E for background information for an explanation of how minimum EMB_c represents the behaviour of these links, and Annex F for a discussion of the derivation of the weight functions.

The following calculations involve the use of weight functions, $W(r)$, that are derived from near-field encircled flux data of laser sources that are characteristic of applications. For a given fibre, the application of several weight functions will yield a number of EMB_c values, the minimum of which is the minimum EMB_c for the fibre.

Generally, the weight function tables provided in the fibre product specification documents are at nominal radii in 1 μm intervals. Depending on the resolution of the radial scanner and the result of the fibre centring, the measured radius of any given waveform may be at a radius slightly different than the nominal radius in the table (i.e. 15,2 μm vs a 15 μm table value). In all cases, use the weighting value closest to the measured radius.

When measured radii are skipped (i.e. measurements at 2 μm increments), then the associated weight value and summation term are omitted.

NOTE The effect of chromatic dispersion is discussed in Clause F.2.

7.3.2 Time domain pulse computation

For each weight set $W_i(r)$, where i denotes the i^{th} weight set of N sets, calculate a resultant output temporal response, $u_i(t)$ utilizing the fibre output pulse information and a weighting function:

$$u_i(t) = \sum_r W_i(r) u'(r, t) \quad (13)$$

where

$W(r)$ is the *DMD* weighting function corresponding to the transmitter used in the application (see Annex C for details on calculating $W(r)$, and see Annex D for examples of $W(r)$ values corresponding to a particular launch specification);

$u'(r, t)$ is the sample output pulse measured at each radial offset r of the four radial directions as a function of time t . Each output pulse is raw (un-normalized in amplitude), after an appropriate subtraction of baseline noise.

7.3.3 Calculate the transfer function

Deconvolve the reference temporal response, $u_{\text{ref}}(t)$, from the resultant output response, $u_i(t)$, according to the method used for bandwidth measurements described in IEC 60793-1-41. This gives the fibre frequency response, $U_i(f)$, referred to the fibre's transfer function:

$$U_i(f) = \frac{FT[u_i(t)]}{FT[u_{\text{ref}}(t)]} \quad (14)$$

NOTE As the Fourier transform yields an array of complex numbers, the ratio of Equation (14) also yields an array of complex numbers.

7.3.4 Compute the power spectrum

Determine the logarithmic power spectrum in decibels:

$$P_i(f) = 5 \times \lg[U_i(f) \times U_{ii}^*(f)] \quad (15)$$

where

$\lg$ is the base-10 logarithm;

$*$ is the complex conjugate.

7.3.5 Compute EMB_c and $minEMB_c$

For each weight set, calculate the –1,5 dB optical bandwidth. It is determined from the lowest frequency where the power spectrum P_i is 1,5 dB below the zero frequency value. EMB_c is then extrapolated to –3 dB using Gaussian assumptions by multiplying it by 1,414.

Determine $minEMB_c$ by finding the minimum EMB_c over all weight sets.

NOTE The bandwidth can be determined by the traditional 3 dB definition (the first point at which the transfer function, $H_{\text{Fib}}(f)$ reaches 50 % or 3 dB). However, highly non-Gaussian responses can be generated using real fibre and real sources. For these responses, the measured 3 dB value has been shown not to provide a good correlation to system performance. The 1,5 dB metric addresses some of the limitations of a wavy transfer function and its effect on the –3 dB value.

7.4 Length normalization

It may be desirable to normalize the value of DMD or EMB_c to a unit length, such as ps/m or MHz·km. If normalization to a unit length is used, the length dependence formula shall be reported.

8 Documentation

8.1 Information to be reported

The following information shall be reported for each test:

- 1) test sample identification;
- 2) test sample length;
- 3) length normalization formula, if used;
- 4) test date;
- 5) source wavelength (nominal or actual);
- 6) each DMD mask result including the mask limits (R_{INNER} and R_{OUTER}) and DMD computed;
- 7) $minEMB_c$ if computed, and OMB_c if computed.

8.2 Information available upon request

The following information shall be available upon request:

- 1) measurement method used;
- 2) description of the test equipment, including the source type and actual source centre wavelength, and the maximum specified or actual spectral width (RMS);
- 3) for *DMD* measurement, documentation of method used to calculate ΔT_{REF} ; for minimum EMB_c , the transfer function features that are used to determine bandwidth, and the set of weightings used;
- 4) radial offsets of measurements;
- 5) detector type, and operating conditions;
- 6) mode field diameter of probe fibre at measurement wavelength (nominal or actual);
- 7) method of stripping cladding light;
- 8) date of latest calibration of test equipment.

9 Specification information

When specifying fibre performance using this test method, the following information shall be specified:

- 1) number and type of samples to be tested;
- 2) test procedure (IEC 60793-1-49);
- 3) test wavelength(s);
- 4) for *DMD* requirements, required *DMD* value for a stated range of minimum and maximum radial offsets, $DMD(R_{\text{INNER}}, R_{\text{OUTER}})$; evaluation of several different *DMD* values for different stated ranges in R_{INNER} and R_{OUTER} may be required;
- 5) for *DMD* measurements, reporting method option from 7.1;
- 6) for EMB_c requirements, required minimum EMB_c value;
- 7) for EMB_c requirements, required set of weights per Annex C.

Annex A (normative)

Source spectral width limitation

A.1 Limiting the effect of chromatic dispersion (CD) on the value of *DMD*

A.1.1 General

The effect of errors introduced by chromatic dispersion on the value of *DMD* shall be less than 10 %. This requirement may be met either by using a source with a spectral width small enough that chromatic dispersion can be ignored, or by accurately determining the spectral shape of the source and calculating the appropriate value of ΔT_{REF} .

The chromatic dispersion, $D(\lambda)$, may be estimated using the limiting values provided by the product specification of the type of fibre under consideration. Alternatively, one may use the worst-case $D(\lambda)$ as given by Clause A.2. The requirement on spectral width may be met either by using a spectrally narrow source, or by using an optical filter at either the source or detection end. The transform limit shall be taken into account when using an optical filter as it may temporally broaden the pulse – this is especially true for nearly ideal sources like Ti:sapphire mode-locked lasers.

Several examples of methods for meeting the requirement of Annex A are now given.

A.1.2 Limit CD contribution to *DMD* to be measured

Use a source with sufficiently narrow spectral width such that the value of

$$\Delta t_{\text{chrom}} = 4\sqrt{\ln(2)}\delta\lambda D(\lambda)L \quad (\text{A.1})$$

is less than 10 % of the *DMD* to be measured. This gives a constraint on RMS spectral width $\delta\lambda$:

$$\delta\lambda \leq \frac{DMD_{\text{min}}}{4\sqrt{\ln(2)}D(\lambda)L} \approx 0,030 \frac{DMD_{\text{min}}}{D(\lambda)L} \quad (\text{A.2})$$

Here, DMD_{min} is the smallest value of *DMD* to be determined, $D(\lambda)$ is the chromatic dispersion, and L is the sample length. Under the typical assumption that waveguide modal delays scale linearly with length, this constraint has no length dependence.

Under this condition, use the approximation $\Delta T_{\text{REF}} = \Delta T_{\text{PULSE}}$ in 6.1 to calculate the value of *DMD*.

EXAMPLE *DMD* values as small as 100 ps are tested on fibre lengths of 0,5 km at a wavelength of 850 nm. From Table A.1, the value of $D(\lambda)$ at 850 nm is 107 ps/nm·km. Substituting this information in Equations (A.1) and (A.2), the source RMS spectral width $\delta\lambda$ will be $\leq (0,03 \times 100 \text{ ps}) / (107 \text{ ps/nm·km} \times 0,5 \text{ km}) = 0,056 \text{ nm}$. The same source would work for a 10 km test length with *DMD* values as low as 2 000 ps.

A.1.3 Limit CD contribution to reference width

Use a source with sufficiently narrow spectral width that ignoring Δt_{chrom} in relation to ΔT_{PULSE} changes the value of ΔT_{REF} by less than 10 %. This gives a constraint on RMS spectral width $\delta\lambda$,

$$\delta\lambda \leq \frac{\sqrt{0,21}\Delta T_{\text{PULSE}}}{4\sqrt{\ln(2)}D(\lambda)L} \approx 0,138 \frac{\Delta T_{\text{PULSE}}}{D(\lambda)L} \quad (\text{A.3})$$

Use $\Delta T_{\text{REF}} = \Delta T_{\text{PULSE}}$ in 6.1, and for calculating the value of *DMD*.

In this case, there is no explicit dependence of source spectral width $\delta\lambda$ on the value of *DMD* being measured. Instead, the minimum value of *DMD* that can be measured is set directly by ΔT_{PULSE} . Note that there is an explicit dependence of the maximum allowed spectral width on sample length. For fixed spectral width, chromatic broadening will become too large to ignore above a certain sample length.

EXAMPLE A particular laser source and optical detector having the value $\Delta T_{\text{PULSE}} = 60$ ps are used to measure 0,5 km samples at 850 nm. Substituting this information into Equation (A.3), the source RMS spectral width $\delta\lambda$ will be $\leq (0,138 \times 60 \text{ ps}) / (107 \text{ ps/nm}\cdot\text{km} \times 0,5 \text{ km}) = 0,15 \text{ nm}$.

A.1.4 Adjust ΔT_{REF} to account for CD contribution

Calculate the appropriate value of ΔT_{REF} for the source being used. ΔT_{REF} is the full width at 25 % of each mode at the output of the fibre under test. For near-Gaussian pulse and spectral shapes, use Equation (A.4):

$$\Delta T_{\text{REF}} = \left(\Delta T_{\text{PULSE}}^2 + \Delta t_{\text{chrom}}^2 \right)^{1/2} \quad (\text{A.4})$$

In this case, the upper limit on the spectral width of the source is set indirectly by the requirement in 7.1 that the minimum value of *DMD* reported by the measurement is $0,9(\Delta T_{\text{REF}})$.

If a source has multiple spectral peaks, or is otherwise sufficiently non-Gaussian, Equation (A.4) may be inaccurate. Other equations may be used if they accurately represent the dispersion-induced pulse broadening, or, if the expected chromatic broadening can be determined experimentally (as a function of fibre length), then the experimental data may be used directly. In any case, when ΔT_{PULSE} is corrected for dispersion to produce an estimate of ΔT_{REF} , the error introduced to the calculation of *DMD* shall be less than 10 %.

A.1.5 High-performance *DMD* fibres and spectral requirements

For very high-performance fibres (i.e. 850 nm 0,1 ps/m), the spectral width requirement approaches the limit of what is physically possible. For example, a titanium-sapphire mode-locked laser has a nearly transform-limited sech-squared pulse, which has a time-bandwidth product of $\sim 0,315$. If we wish to use this type of laser to measure 300 m of 0,1 ps/m fibre (30 ps of *DMD*), the pulse-width of this laser cannot be more than 33 ps, *FWQM*, which translates to ~ 22 ps *FWHM*. Using the time-bandwidth product, this means the pulse is physically limited to having a spectral width no smaller than $\sim 14,3$ GHz ($0,315/22$ ps), which at 850 nm is 0,034 nm. Multiplying 0,034 nm with the CD of 107 ps/nm·km and the length of 0,3 km yields a chromatic dispersion contribution of 1 ps, or an error of 3,3 %.

The above example assumes that the detection system does not broaden the pulse, and the laser's temporal pulse width is the limiting width. In a typical high performance system, the limiting component is usually the detector, and the laser will have an actual temporal width much smaller than the pulse width observed on the sampling system. Typical values for these types of lasers are 10 ps *FWHM*, which means the laser can be no narrower than 0,075 nm, yielding a CD error of ~ 7 %. If the laser is not close to transform limited, it will be further broadened.

A.2 Chromatic dispersion in multimode fibres

The data in Table A.1 represents the highest expected dispersion for any of the commercially available category A1 fibres, based on nominal dispersion performance and numerical aperture (NA). At wavelengths lower than 1 200 nm, dispersion is greatest with fibre having maximum λ_0 (0,29 NA fibre). At wavelengths greater than 1 400 nm, dispersion is greatest with fibre having minimum λ_0 (0,20 NA fibre). Here, λ_0 is the zero-dispersion wavelength. Table A.1 is not used for wavelengths between 1 200 nm and 1 400 nm. Instead, use $D = 16,6$ ps/nm·km.

Table A.1 – Worst-case chromatic dispersion

λ (nm)	D (ps/nm·km)	λ (nm)	D (ps/nm·km)	λ (nm)	D (ps/nm·km)
780	146				
790	140				
800	133	1 000	54,2	1 400	8,28
810	128	1 010	51,8	1 410	9,08
820	122	1 020	49,2	1 420	9,85
830	117	1 030	46,9	1 430	10,6
840	112	1 040	44,7	1 440	11,4
850	107	1 050	42,5	1 450	12,1
860	102	1 060	40,3	1 460	12,8
870	98,0	1 070	38,2	1 470	13,5
880	93,7	1 080	36,2	1 480	14,2
890	89,7	1 090	34,3	1 490	14,9
900	85,7	1 100	32,4	1 500	15,6
910	82,1	1 110	30,6	1 510	16,2
920	78,4	1 120	28,9	1 520	16,9
930	75,0	1 130	27,2	1 530	17,5
940	71,6	1 140	25,5	1 540	18,1
950	68,6	1 150	23,9	1 550	18,8
960	65,5	1 160	22,4	1 560	19,4
970	62,5	1 170	20,8	1 570	20,0
980	59,6	1 180	19,4	1 580	20,6
990	57,0	1 190	17,9	1 590	21,1
				1 600	21,7
Assumptions:					
– for $\lambda < 1\,200$ nm: $S_0 = 0,095\,62$ ps/(nm ² ·km); $\lambda_0 = 1\,344,5$ nm for a nominal multimode fibre with 0,29 NA.					
– for $\lambda > 1\,400$ nm: $S_0 = 0,101$ ps/(nm ² ·km); $\lambda_0 = 1\,310$ nm for a nominal multimode fibre with 0,20 NA.					

Annex B (informative)

Determination of fibre optical centre

B.1 General

Before the collection of *DMD* scans, the fibre's centre shall be known since, as defined by this document, *DMD* waveforms are a collection of pulse response waveforms as a function of the radial coordinate of an azimuthally symmetric multimode fibre. If an axial scan is made with an incorrect centre reference, determination of *DMD*, *EMB_C* and *OMB_C* may be significantly erroneous. Thus, the determination of the fibre's centre with respect to the *DMD* scanner is critical.

After the fibre is mounted into the measurement apparatus, its scanning centre is unknown. The fibre's location can be controlled to some precision by referencing the cladding surface, but the optical centre of the core cannot be controlled to a sufficient precision by referencing the cladding's outer surface alone. The cladding's diameter, core/clad concentricity and the difference between a core centre defined by, for example, a video microscope and the *DMD* scanner are all examples of errors which are too large to determine the proper centre coordinate. This document requires that the analysis of a set of preliminary waveforms is employed to determine the centre of both the *x*- and *y*-axes. This centre is used to report the scan coordinate for all waveforms used in *DMD* determination.

B.2 Method

The centre of the *DMD* axis is found by integrating individual waveforms at radius *r* with respect to time (the area) as a signal (which is proportional to the pulse energy emanating from the fibre).

$$v(r) = \int_0^T V(r, t) dt \quad (\text{B.1})$$

The area is recorded as a function of scanner axial positions and this area set is used to determine the axial centre. A typical set of areas as a function of position is shown in Figure B.1.

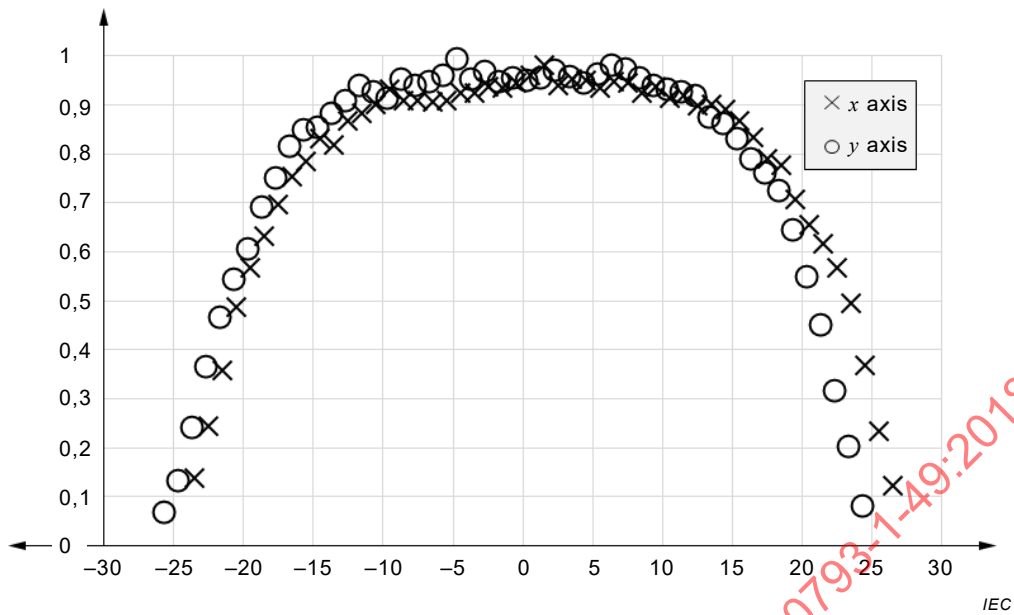


Figure B.1 – Typical area data from centring waveforms

These curves represent a complete scan of each axis. Each datum is found by moving the scanner to the approximate position (approximate because the centre is unknown, and the scanner is assumed to have a limited resolution), then a waveform is acquired and its area computed. The centre of each axis is presumed to be found when these curves are centred about zero according to one of two selectable criteria.

The waveforms required for centring do not require the same *SNR* as the waveforms required for *DMD* analysis. The resultant decrease in averaging time reduces the time it takes to find the centre.

If the complete curves are acquired for each scan, a first-moment analysis should be employed to determine the centre of each curve, which yields the centre of each axis:

$$C_A = \frac{\int_{-R_{CORE}}^{R_{CORE}} r_A \left[\int_0^T V(A, r_A, t) dt \right] dr_A}{\int_{-R_{CORE}}^{R_{CORE}} \int_0^T V(A, r_A, t) dt dr_A} \quad (B.2)$$

where

R_{CORE} is the radial scan limit (usually $\pm$ the nominal fibre core radius);

T is the width (in time) of the sampling window;

$V(t)$ is the acquired waveform at a given radial position r ;

C_A is the centre of the scan for axis A (x- or y-axis).

NOTE It is generally sufficient to replace the integrals with simple summations.

Collection of the complete area vs position curves is time consuming, so this document allows another centring approach using the same integrated *DMD* waveforms, but employing a search methodology. This approach, assuming a fibre of nominal core radius R_{CORE} , requires fewer waveform acquisitions which reduces the time required to determine the correct centre. The following steps describe the general approach.

- 1) At the nominal centre, acquire $v(0)$ and set P , the target threshold, as $0,2 \times v(0)$.
- 2) Use the x -axis for steps 3) to 7) replacing the x axis position for variable r .
- 3) Set $D = 1$.
- 4) Set $\Delta = R_{\text{CORE}} \times D$, $r = 0$.
- 5) Move to a new $r = r + \Delta$, acquire new $v(r)$.
- 6) If $v(r) \times \Delta \times D < P \times \Delta \times D$, set $\Delta = -\Delta$.
- 7) Set $\Delta = \Delta/2$.
- 8) If $|\Delta| \leq 0,25 \mu\text{m}$, set $c(D) = r$ and go to step 9), otherwise go to step 5).
- 9) If $D = -1$, go to step 10), otherwise set $D = -1$ and go to step 4).
- 10) Set scanner axis to position $r = [c(-1) + c(1)]/2$. The centre for this axis is found.
- 11) If axis is the x -axis, switch to the y -axis replacing the y -position for variable r and go to step 3), stop otherwise as both axes have been centred.

It should be noted that using the collection of waveforms from a measurement to determine (post-measurement) the centre (as opposed to finding the centre before the measurement waveforms are collected) will probably not be practical for three reasons. To centre the waveform set, waveforms shall be collected from $-R_{\text{CORE}}$ to $+R_{\text{CORE}}$ which forces the collection of both quadrants in cases where one quadrant would suffice. The set of waveforms collection shall extend to R_{CORE} , so if the scanner is sufficiently off-centre before the waveforms are collected, the waveform set may not reach the required scan limit on one side or the other, and, as the scanner shall have resolution smaller than the scan increment, the collected waveforms may end up having radial positions which are significantly far away from their targets (i.e. 20,5 instead of 20,0). Each of these impracticalities may be overcome in some circumstances, but overcoming them all would require waveform collection over a wider range and at more than the required resolution.

Annex C (normative)

Detection system modal measurement

C.1 General

It is common that a detector's transfer function be dependent on the spatial intensity distribution presented to the input of the detector for several reasons. Surface imperfections of the detector can cause quantum efficiency uniformity to be non-ideal. Often, very high-frequency detectors are fibre-coupled; the transfer efficiency of the input of the coupling fibre to the detector can be non-ideal. These, and other possible causes, can cause a detector to be effectively modally sensitive, that is, has a transfer function that is dependent on the population of mode groups in a test fibre. This particular distortion can contribute noticeable errors in the determination of metrics which rely on fidelity of pulse amplitude. Example metrics include EMB_c and OMB_c .

At the time of publication of this document, the technical requirements of detectors usable for this measurement nearly exceed their commercial availability. Many very high-performance detectors exhibit some degree of modal dependence; in some cases, the extent of modal dependence of these hard to acquire (and thus expensive) detectors would effectively disqualify their use in a measurement system used to screen very high bandwidth fibres. It is important to screen any detector for modal dependence before its deployment in a measurement system used to compute these parameters. Annex C describes this screening methodology.

NOTE Annex C is written with detectors intended for characterization of type 1a multimode fibres at 850 nm, as these fibres are the most studied for this error at the time of publication of this document. Its concepts can be extended to other wavelengths and fibre types, but Annex C is not normative for any other wavelengths or fibre types.

C.2 Determination of coupling function

C.2.1 Overview

The coupling function is an experimentally determined approximation of the ratio of the relative energy coupled into a perfect (that is, a modally-independent detector) to the relative energy coupled into the detector under study. Essentially, the *DMD* measurement system is used for the experiment, replacing the long fibre normally characterized with a short fibre (2 m). *DMD* pulses are then collected. The collected pulses are analyzed for relative energy instead of temporal parameters. The coupling function is then determined.

C.2.2 Fibre sample and coupling

Select a 2 m length of fibre whose core diameter and numerical aperture is as close to the nominal values (50 μm , 0,2) as possible. Place this sample into the measurement system and find its optical centre as described in 6.2. Adjust the time base of the sampling system to centre the pulse with reasonable resolution.

C.2.3 Detector response

Collect the set of raw pulse data, $u(r, t)$, at radii from $-26 \mu\text{m}$ to $+26 \mu\text{m}$ along one diameter of the fibre's core. Collect a baseline data set, $uB(t)$, by blocking or disabling the laser. Use the collected pulses and the baseline to compute the un-centred detector response function, $p'(r)$.

$$p'(r) = \frac{\sum_t u(r,t) - \sum_t u_B(t)}{\sum_t u(0,t)} \quad (\text{C.1})$$

Lastly, centre $p'(r)$ to get the detector response function

$$r_0 = \frac{\sum_r r \cdot p'(r)}{\sum_r p'(r)} \quad (\text{C.2})$$

$p(r) = p(|r - r_0|)$

NOTE $p(r)$ is over positive radii only. It is convenient to re-interpolate $p(r)$ at 1 μm intervals from 0 to 25 for future use.

C.2.4 Reference response

C.2.4.1 Discussion

The reference can be either measured (C.2.4.2) or derived theoretically (C.2.4.3). Refer to each subclause for more information.

C.2.4.2 Measured reference response

Couple the short fibre sample's output end to a power metre or other suitable DC detector whose optical acceptance geometry is much greater than the fibre's. Without changing the fibre centre or otherwise disturbing the launch system, scan the same radii as C.2.3, recording the power on the power meter, $p'_R(r)$. Determine $p_R(r)$ by re-centring and interpolation as described in C.2.3.

C.2.4.3 Computed reference response

Table C.1 provides the theoretical normalized coupling efficiency, $p_R(r)$, of the light emitted from a probe fibre with a 5 μm mode field diameter at 850 nm into a nominal 50 μm fibre under test for integer micrometre radial offset increments. This information may assist in generating a detector correction matrix, $C_d(r)$, as described in 4.7.

Table C.1 – Theoretical normalized coupling efficiency

R μm	Coupling efficiency	R μm	Coupling efficiency	R μm	Coupling efficiency
0	1,000 00	10	0,997 41	20	0,928 99
1	0,999 54	11	0,996 91	21	0,890 31
2	0,998 83	12	0,996 15	22	0,805 95
3	0,998 70	13	0,995 01	23	0,654 75
4	0,998 59	14	0,993 29	24	0,466 46
5	0,998 51	15	0,990 92	25	0,295 73
6	0,998 45	16	0,986 90	26	0,174 12
7	0,998 22	17	0,980 75	27	0,100 31
8	0,997 11	18	0,971 89	28	0,058 99
9	0,997 05	19	0,954 55	29	0,036 14
				30	0,023 08

C.2.5 Coupling function determination

Compute the detector's coupling function as the ratio of the detector's response function to the reference response function

$$C(r) = \frac{p(r)}{p_R(r)} \quad (\text{C.3})$$

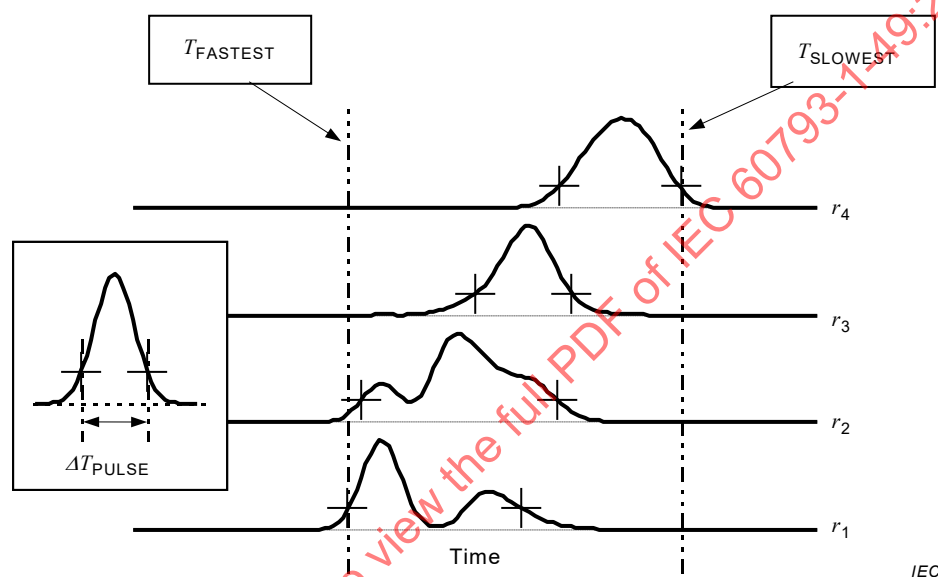
IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60793-1-49:2018

Annex D (informative)

Discussion of measurement details

D.1 DMD

This document focuses on determining the difference in delay times between the fastest and slowest mode groups excited for a stated range of excitation conditions, as illustrated in Figure D.1. The *DMD* data resulting for these measurements may be compared to *DMD* specifications that have been determined by modelling and experimentation to correspond to a minimum *EMB* for a range of transmitters.



Leading and trailing edge times (25 % threshold) are identified with "+". Traces are offset for different excitation positions. Inset shows ΔT_{PULSE} .

Figure D.1 – Idealized *DMD* data

For any given offset position, the spot from the single-mode probe excites several different mode groups. The resulting output waveform, $U(r,t)$, exhibits a complicated time dependence, typically showing multiple peaks, and with no guarantee that the individual mode groups will be clearly resolved. The detection level for the leading and trailing edges is chosen at 25 % of peak amplitude of a given waveform. This accounts for instances when the mode group maximally excited by the probe spot at a given offset is separated in time from the other mode groups excited at the same offset. The 25 % level assures detection of the separated mode group even when the other modes all have the same delay time, causing their combined amplitude to exceed that of the separated mode group.

The difference between T_{SLOW} and T_{FAST} will be greater than the *DMD* by an amount that depends on the temporal width of the optical pulse, the finite bandwidth of the optical detector, and the broadening of each mode due to the source spectral width and the chromatic dispersion of the fibre under test.

The temporal width of the optical pulse and the finite detector bandwidth are characterized as ΔT_{PULSE} . In the limit of small ΔT_{PULSE} , and assuming a Gaussian shape for the spectrum of the source, the temporal width at 25 % of maximum of each mode at the output of the fibre under test will be

$$\Delta t_{\text{chrom}} = 4 \times \sqrt{\ln(2)} \times \delta\lambda \times D(\lambda) \times L \quad (\text{D.1})$$

where

$\delta\lambda$ is the RMS spectral width of the source (in nm);

$D(\lambda)$ is the dispersion coefficient (in ps/(nm·km));

L is the sample length (in km).

The factor $4 \times \sqrt{\ln(2)}$ comes from the use of 25 % of maximum amplitude as the threshold for evaluating *DMD*, along with the use of RMS spectral width in characterizing the source.

The full width at 25 % of each mode at the output of the fibre under test is then

$$\Delta T_{\text{REF}} = \left(\Delta T_{\text{Pulse}}^2 + \Delta t_{\text{chrom}}^2 \right)^{1/2} \quad (\text{D.2})$$

and the *DMD* is given by

$$DMD = T_{\text{SLOWEST}} - T_{\text{FASTEST}} - \Delta T_{\text{REF}} \quad (\text{D.3})$$

where

T_{FASTEST} and T_{SLOWEST} are, respectively, the earliest and latest pulse features over the set of radii measured.

NOTE While ΔT_{PULSE} is fixed by the duration of the optical pulse and the detector bandwidth, the value of Δt_{chrom} varies with the sample length. Limiting the effect of chromatic dispersion involves using a source with a value of $\delta\lambda$ that depends on the value of *DMD* being measured, the length of sample being measured, and the value of ΔT_{PULSE} , as detailed in Annex A.

Since the determination of *DMD* involves comparing the delay times from different waveforms from measurements made at different offset positions, jitter in the timing or duration of the probe pulse is a potential problem. The lower reporting limit for *DMD*, $0,9(\Delta T_{\text{REF}})$, assures an error of < 10 %, limited primarily by the total system jitter.

D.2 *EMB_c* calculation

The idea behind the *EMB_c* calculation is to use the *DMD* pulse information to predict the effect of pulse spread due to intermodal dispersion when the fibre is used with actual transmitters. By generating a weighted sum of the *DMD* pulses, the effects of different mode group power distributions of different transmitters can be examined to determine a representative worst-case pulse shape via Fourier transform to the frequency domain. By including a range of actual mode power distributions, but only those corresponding to transmitters conforming to a launch specification, the performance of the fibre can be measured for such launch specification without unnecessarily restricting the fibre.

The effective modal bandwidth (*EMB*) of a fibre depends by definition only on the modal delays and the modal power weighting. It is usually assumed that there is complete coupling within a mode group so that mode group delays will determine the *EMB* (and, in fact, the performance of an actual fibre with an actual transmitter). It is further assumed that there is no coupling between mode groups. If the mode group delays and their relative power for group g are denoted by τ_g and P_g , respectively, then the complex transfer function from which the *EMB* is determined has the form

$$H(f) = \sum_g P_g \exp(i2\pi f \Delta\tau_g) \quad (D.4)$$

where

$$\Delta\tau_g = \tau_g - \tau_{\text{ave}}, \text{ and}$$

τ_{ave} is the centroid of the mode groups given by $\tau_{\text{ave}} = \sum_g P_g \tau_g$.

The amplitude $|H(f)|$ from which the bandwidth is customarily calculated has the form:

$$|H(f)| = \sqrt{\left[\left(\sum_g P_g \cos(2\pi f \Delta\tau_g) \right)^2 + \left(\sum_g P_g \sin(2\pi f \Delta\tau_g) \right)^2 \right]} \quad (D.5)$$

The standard definition of bandwidth (IEC 60793-1-41) for multimode fibres is the -3 dB frequency f where $|H(f)|$ first reaches 0.5. In practice, depending on the mode delays and their relative power, $|H(f)|$ may have waves and plateaus so that the -3 dB bandwidth may not be robust to small changes in the mode power distribution seen in practice. This is well known (see [3] and [4]). The $-1,5$ dB bandwidth is more robust with respect to these characteristics.

The calculation of EMB_c has three steps.

- 1) Each *DMD* measurement pulse $u(r, t)$ taken at an offset of r (μm) is given a relative weight W_r , and the sum of the weighted pulses gives a weighted output pulse $P_o(t)$.
- 2) The effect of the reference on the output pulse is removed using a deconvolution as described in 7.3. This gives the fibre frequency response or transfer function, the complex function $H(f)$ above.
- 3) EMB_c is determined from the complex transfer function as described in 7.2 using the $-1,5$ dB bandwidth value.

For a specific fibre, steps 1) to 3) are repeated with a set of weightings, corresponding to a set of mode power distributions, and the minimum EMB_c determined from the set is a measure of the minimum performance of the fibre with a set of transmitters corresponding to the weightings. It is not necessary that every weighting correspond to an actual transmitter.

The approach to specifying performance for a given fibre in terms of EMB_c is made robust by the use of minima and the use of an adjusted bandwidth. Effectively, this provides an estimate of the worst-case *EMB* (and hence, in the link model, of inter-symbol interference (ISI) penalty performance), as long as a broad enough set of weightings is included and the range of launch distributions spans the range allowed for a given application. Typically, if the transmitter launch distributions are sufficiently unique and distributed across the allowed launch distribution range, 5 to 10 weightings (corresponding roughly to 5 to 10 transmitters) are sufficient to determine the minimum EMB_c .

The minimum EMB_c is the minimum value of a set of EMB_c values. Individual EMB_c values are determined by applying a specific radial weight function, $W(r)$ to the set of radial waveforms, $u'(r,t)$. A particular representative transmitter mode power distribution, and the set of weight functions represents the range of transmitter mode power distributions expected for the fibre's application. The user may specify an additional multiplier that is used to align EMB_c to the theoretical effective modal bandwidth required by the application.

The *DMD* weightings, $W(r)$, correspond to the mode power distribution of a transmitter consistent with the launch condition specifications of the optical transmitters utilized in the application. A set of weight functions is specified by the fibre's product specification. The radial offsets used to specify $W(r)$ shall include those of the intended $u'(r,t)$ measurement. A default set of weightings applicable to, for example, IEEE 802.3 [5] 10GBASE-S and INCITS 364 10GFC [6], is specified in IEC 60793-2-10 and is also included as an example in Annex F. Annex E provides a procedure for generating *DMD* weights from encircled flux data.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60793-1-49:2018

Annex E (informative)

Determining *DMD* weights for *EMB_c* calculation

E.1 Selecting a set of weightings

The weightings for an individual *EMB_c* calculation can be denoted by the vector W_r , where r is the offset of the *DMD*. The set of weightings needed to calculate the minimum *EMB_c* can be denoted by a matrix W_{rL} , where L corresponds to a specific weighting. The specific weighting may be linked to a specific transmitter which is being "modelled", or it may be a purely theoretical weighting. The connection to a specific transmitter needs to be understood as approximate because the weighting only duplicates one feature of the transmitter, the mode power distribution. Nevertheless, by calculating the minimum *EMB_c* with a broad range of weightings, approximating a broad range of transmitters, the fibre can be assured of a minimum *EMB* with actual transmitters that produce mode power distributions within that range.

The set of weightings shall be specific for the transmitter specifications and for the bit rate requirements (bandwidth requirements). Annex F contains an example set of *DMD* weightings.

E.2 Procedure for generating *DMD* weightings given encircled flux data

To generate the appropriate *DMD* weighting corresponding to encircled flux data for a particular transmitter, taken according to IEC 61280-1-4:

- 1) convert the encircled flux data to a calculated mode power distribution P_g ;
- 2) convert the mode power distribution P_g to a *DMD* weighting W_r .

The methods summarized here provide for the calculation of a mode power distribution (*MPD*) from encircled flux data, and for calculation of *DMD* weightings from the mode power distribution. Given *DMD* weightings, it is straightforward to reverse the calculation and calculate the mode power distribution from the *DMD* weightings and then the near-field intensity (or encircled flux) from the mode power distribution. The methods assume that the encircled flux measured at the far end of a 10 m piece of fibre adequately represents the mode power distribution of the source.

The encircled flux measured according to IEC 61280-1-4 and the near-field intensity are related by the equation

$$EF(r) = \frac{\int_0^r I(r) r dr}{\int_0^{r_{\max}} I(r) r dr} \quad (\text{E.1})$$

where

r is the radial offset ($r_{\max}$ is typically 1,15 the core radius).

The calculation of the *DMD* weighting, W_r , is a two-step process:

- 1) from the near-field intensity, I_r , calculate the mode power distribution, P_g ;
- 2) from the mode power distribution, P_g , calculate the weighting function, W_r .

P_g is estimated from the near-field measurement, assuming full coupling within a group, incoherence, and that the transmitted near field is well approximated by the measured near-field on a short length of fibre. In this case, there is a connection between the near-field intensity $I(r)$ and the modal weighting functions of the scalar wave equation:

$$I(r) = \sum_m P_m \Psi_m^2(r) \quad (\text{E.2})$$

Here, P_g is written in terms of the individual modes before any coupling occurs. Because of the large number of individual modes (and other reasons), it is not feasible to solve for the individual modes, but if coupling within a group is assumed, then:

$$P_g \Psi_g^2(r) = \sum_{m \in G} P_m \Psi_m^2(r) \quad (\text{E.3})$$

and we need to solve for P_g from the equation:

$$I(r) = \sum_g P_g \Psi_g^2(r) \quad (\text{E.4})$$

$\Psi_g^2(r)$ is known theoretically, and the P_g can be solved by a least squares procedure given a known $I(r)$.

Once P_g is known, the weighting function W_r is related to it by a matrix, P_{rg} , which gives the relative power in mode group g for a *DMD* offset at position r (see [8] and [9]). The values of r are uniformly spaced to permit interpolation of W_r for measurement radii that do not coincide exactly with the chosen radii. At this point, a second least squares equation needs to be solved:

$$P_g = \sum_r W_r P_{rg} \quad (\text{E.5})$$

This approach and its variants below are aligned with the 10 GbE *EMB* modelling, which used the modal power distribution P_g for 2 000 theoretically constructed lasers.

The W_r calculated in this way will zero the mode power P_g in the last two mode groups (groups 18 and 19 in 10 GbE model) to account in a standard way for differential mode attenuation, as was done in the TIA modelling.

If, in the course of calculating, negative values should arise, set them to zero before calculating W_r . If, in turn, negative values of W_r should arise, set them to zero as well. An iterative least squares procedure constraining W_r to be positive will avoid this problem.

Annex F (informative)

EMB_c calculation information

F.1 Default *DMD* weightings for transmitters conforming to IEC 60793-2-10

The example set of weightings in Table F.1 and Table F.2 are specific to transmitters meeting the requirements of IEC 60793-2-10:2004 [7], Annex D.1, such as those of IEEE 802.3 [5] application for 10GBASE-SR and the fibre channel application of INCITS 364 10GFC [6]. Weightings are provided for a *DMD* measured at 1 µm intervals, for 10 lasers corresponding to the range actually seen.

Table F.1 – *DMD* weightings

<i>r</i>	Laser ID				
	1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	0
1	0,033 023	0,023 504	0	0	0
2	0,262 463	0,188 044	0	0	0
3	0,884 923	0,634 634	0	0	0
4	2,009 102	1,447 235	0,007 414	0,005 637	0,003 034
5	3,231 216	2,376 616	0,072 928	0,055 488	0,029 856
6	3,961 956	3,052 908	0,262 906	0,200 05	0,107 634
7	3,694 686	3,150 634	0,637 117	0,483 667	0,258 329
8	2,644 369	2,732 324	1,197 628	0,896 95	0,458 494
9	1,397 552	2,060 241	1,916 841	1,402 833	0,661 247
10	0,511 827	1,388 339	2,755 231	1,957 805	0,826 035
11	0,110 549	0,834 722	3,514 797	2,433 247	1,000 204
12	0,004 097	0,419 715	3,883 317	2,639 299	1,294 439
13	0,000 048	0,160 282	3,561 955	2,397 238	1,813 982
14	0,001 111	0,047 143	2,617 093	1,816 953	2,506 95
15	0,005 094	0,044 691	1,480 325	1,296 977	3,164 213
16	0,013 918	0,116 152	0,593 724	1,240 553	3,572 113
17	0,026 32	0,219 802	0,153 006	1,700 02	3,618 037
18	0,0367 99	0,307 088	0,012 051	2,240 664	3,329 662
19	0,0394 65	0,329 314	0	2,394 077	2,745 395
20	0,0321 52	0,268 541	0	1,952 429	1,953 241
21	0,0199 92	0,166 97	0	1,213 833	1,137 762
22	0,0088 32	0,073 514	0	0,534 474	0,494 404
23	0,0026 12	0,021 793	0	0,158 314	0,146 517
24	0,0002 82	0,002 679	0	0,019 738	0,018 328
25	0	0	0	0	0

Table F.2 – DMD weightings

<i>r</i>	Laser ID				
	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0
1	0,015 199	0,016 253	0,022 057	0,010 43	0,015 681
2	0,120 91	0,129 011	0,176 39	0,083 496	0,124 978
3	0,407 702	0,434 844	0,595 248	0,281 802	0,421 548
4	0,925 664	0,987 184	1,351 845	0,650 28	0,957 203
5	1,488 762	1,587 6	2,174 399	1,130 599	1,539 535
6	1,825 448	1,946 614	2,666 278	1,627 046	1,887 747
7	1,702 306	1,815 285	2,486 564	2,044 326	1,762 955
8	1,218 378	1,299 241	1,780 897	2,291 72	1,292 184
9	0,643 911	0,686 635	0,945 412	2,280 813	0,790 844
10	0,238 557	0,255 85	0,360 494	1,937 545	0,559 38
11	0,098 956	0,131 429	0,163 923	1,383 006	0,673 655
12	0,204 274	0,327 091	0,318 712	0,878 798	1,047 689
13	0,529 982	0,848 323	0,778 983	0,679 756	1,589 037
14	1,024 948	1,567 513	1,383 174	0,812 36	2,138 626
15	1,611 695	2,224 027	1,853 992	1,074 702	2,470 827
16	2,210 689	2,555 06	1,914 123	1,257 323	2,361 764
17	2,707 415	2,464 566	1,511 827	1,255 967	1,798 213
18	2,938 8	2,087 879	0,908 33	1,112 456	1,059 264
19	2,739 32	1,577 111	0,386 991	0,879 309	0,444 481
20	2,0908 74	1,056 343	0,111 76	0,608 183	0,123 304
21	1,2615 64	0,595 102	0,014 829	0,348 921	0,012 552
22	0,552 14	0,256 718	0,001 818	0,151 12	0
23	0,1636 27	0,076 096	0,000 54	0,044 757	0
24	0,020 443	0,009 446	0	0,005 639	0
25	0	0	0	0	0

F.2 Example method to determine if an adjusted bandwidth (BW) metric is adequate

One method to determine if an adjusted BW metric is adequate is to make use of the TIA 10 GbE modelling work (see [10]) and the simulation of the 40 000 links, including *EMB* and ISI. The full transfer function can be calculated for each of the 10 000 straight links with no connectors. If the *EMB*, calculated with –3 dB BW or an adjusted BW, is greater than 2 000 MHz·km, then the fibre should also pass the ISI requirement of 2,6 dB. A number of fibres either pass –3 dB BW > 2 000 MHz·km and fail ISI, or fail –3 dB BW > 2 000 MHz·km and pass ISI. An adjusted BW metric M1 is an improvement over metric M2 if it shifts the distribution of fibres so that more fibres passing the 2 000 MHz·km condition also pass ISI, but without incurring an additional penalty of extra ISI-passing fibres being shifted below 2 000 MHz·km. The exact balance between these two goals depends on other requirements, but the ideal adjusted BW metric will have no fibres in either category.

As modelling proceeds to other bit rates and lengths, a particular adjusted BW metric will be preferred if it applies in multiple situations and thus is "scalable".

In order to achieve agreement between a performance metric such as measured effective bandwidth, which includes the effects of chromatic dispersion and source spectral characteristics, and predicted minimum EMB_C , it may be necessary to correct the calculated transfer function for the effect of chromatic dispersion caused by the source's spectral content. If the impact of chromatic dispersion is significant, the chromatic dispersion transfer function created by the source spectrum is convolved with the fibre transfer function calculated in 7.3. The chromatic dispersion transfer function is calculated by taking the source spectrum and multiplying it by the measured delay as a function of wavelength.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60793-1-49:2018

Bibliography

- [1] IEC 60793-2-10, *Optical fibres – Part 2-10: Product specifications – Sectional specification for category A1 multimode fibres*
- [2] ITU-T Recommendation G.650.1, *Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable*
- [3] SCHICKETANZ, D., Fitting of a weighted Gaussian lowpass filter to the transfer function of graded-index fibres to reduce bandwidth ambiguities. *Electronics Letters.*, 1983, Vol. 19, Issue 17, p. 651-652.
- [4] STONE, FT., Problems in bandwidth measurement and a suggested solution. *Journal of Lightwave Technology.*, 1983, vol. 1, p. 207.
- [5] IEEE 802.3-2015 - IEEE Standard for Ethernet
- [6] ANSI INCITS 364-2003 Information technology - Fibre Channel - 10 Gigabit (10GFC)
- [7] IEC 60793-2-10:2004, *Optical fibres – Part 2-10: Product specifications – Sectional specification for category A1 multimode fibres*
- [8] JEUNHOMME, L. and POCHOLLE, JP., Selective mode excitation of graded index optical fibers. *Applied Optics.* 1978, Vol. 17, Issue 3, p. 463-468.
- [9] SNYDER, AW. and LOVE, JD., *Optical Waveguide Theory.* London: Chapman and Hall, 1983.
- [10] PEPELJUGOSKI, P., GOLOWICH, S., RITGER, J., KOLESAR, P., RISTESKI, A., Modeling and simulation of next-generation multimode fiber links. *IEEE Journal of Lightwave Technology.*, 2003, Vol. 21, Issue 5, p. 1 242-1 255.
- [11] PEPELJUGOSKI, P., HACKERT, M., ABBOTT, J., SWANSON, S., GOLOWICH, S., RITGER, J., KOLESAR, P., CHEN, YC., and PLEUNIS, P., Development of System Specification for Laser-Optimized 50-µm Multimode Fiber for Multigigabit Short-Wavelength LANs. *IEEE Journal of Lightwave Technology.*, 2003, Vol. 21, Issue 5, p. 1 256-1 275.
- [12] IEC 60793-1-42, *Optical fibres – Part 1-42: Measurement methods and test procedures – Chromatic dispersion*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60793-1-49:2018

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	42
1 Domaine d'application	44
2 Références normatives	45
3 Termes et définitions	45
4 Appareillage	47
4.1 Vue d'ensemble	47
4.2 Source optique.....	47
4.3 Fibre sonde.....	48
4.4 Dispositif de balayage.....	48
4.5 Couplage entre sonde et échantillon d'essai	48
4.6 Extracteur de modes de gaine.....	49
4.7 Système de détection.....	49
4.8 Echantillonneur et numériseur.....	49
4.9 Appareil de calcul	50
4.10 Performance du système	50
4.10.1 Généralités.....	50
4.10.2 Stabilité temporelle des impulsions.....	50
4.10.3 Limite de fréquence de stabilité du système	51
5 Echantillonnage et spécimens	51
5.1 Echantillon d'essai	51
5.2 Faces d'extrémités du spécimen	51
5.3 Longueur des spécimens	51
5.4 Déploiement des spécimens	51
5.5 Positionnement du spécimen.....	52
6 Procédure.....	52
6.1 Couplage de fibres et réglage du système	52
6.2 Détermination du centre.....	52
6.3 Mesure de l'échantillon d'essai	52
6.3.1 Choix des rayons et du quadrant	52
6.3.2 Collecte des données de balayage	53
6.4 Détermination de ΔT_{PULSE} et de ΔT_{REF}	53
6.5 Méthode d'essai de référence	53
7 Calculs et interprétation des résultats	53
7.1 Généralités	53
7.2 Retard différentiel de mode (<i>DMD</i>).....	53
7.2.1 Généralités.....	53
7.2.2 Déconvolution.....	54
7.2.3 Repliement d'impulsion.....	54
7.2.4 Détermination du retard différentiel de mode (<i>DMD</i>)	55
7.3 Largeur de bande modale efficace minimale calculée.....	56
7.3.1 Généralités.....	56
7.3.2 Calcul des impulsions dans le domaine temporel	56
7.3.3 Calcul de la fonction de transfert	56
7.3.4 Calcul du spectre de puissance	57
7.3.5 Calcul d' EMB_C et de $minEMB_C$	57
7.4 Normalisation de la longueur.....	57

8	Documentation	57
8.1	Information à consigner	57
8.2	Informations disponibles sur demande	57
9	Informations relatives à la spécification	58
	Annexe A (normative) Limite de la largeur spectrale de la source	59
A.1	Limitation de l'effet de la dispersion chromatique sur la valeur du <i>DMD</i>	59
A.1.1	Généralités	59
A.1.2	Limiter la contribution de la dispersion chromatique au <i>DMD</i> à mesurer.....	59
A.1.3	Limiter la contribution de la dispersion chromatique à la largeur de référence	60
A.1.4	Ajuster ΔT_{REF} pour tenir compte de la contribution de la dispersion chromatique.....	60
A.1.5	Fibres de <i>DMD</i> hautes performances et exigences spectrales	60
A.2	Dispersion chromatique dans les fibres multimodales	61
	Annexe B (informative) Détermination du centre optique d'une fibre	63
B.1	Généralités	63
B.2	Méthode.....	63
	Annexe C (normative) Mesure de la dépendance modale d'un système de détection	66
C.1	Généralités	66
C.2	Détermination de la fonction de couplage.....	66
C.2.1	Vue d'ensemble	66
C.2.2	Echantillon de fibre et couplage.....	66
C.2.3	Réponse du détecteur.....	66
C.2.4	Réponse de référence	67
C.2.5	Détermination de la fonction de couplage	68
	Annexe D (informative) Discussion des détails de mesure	69
D.1	<i>DMD</i>	69
D.2	Calcul de l' EMB_C	70
	Annexe E (informative) Détermination des pondérations de <i>DMD</i> pour le calcul de l' EMB_C	73
E.1	Sélection d'un jeu de pondérations	73
E.2	Procédure pour générer des pondérations de <i>DMD</i> liées aux données des flux inscrits	73
	Annexe F (informative) Informations relatives au calcul d' EMB_C	75
F.1	Pondérations de <i>DMD</i> par défaut pour des émetteurs conformes à l'IEC 60793-2-10	75
F.2	Exemple de méthode pour déterminer si une valeur de largeur de bande ajustée est appropriée	76
	Bibliographie.....	78
	Figure 1 – Exemple d'appareillage	47
	Figure B.1 – Données de zones typiques obtenues à partir des formes d'onde de centrage	64
	Figure D.1 – Données de <i>DMD</i> idéales	69
	Tableau A.1 – Dispersion chromatique la plus défavorable	62
	Tableau C.1 – Efficacité de couplage normalisée théorique	68
	Tableau F.1 – Pondérations de <i>DMD</i>	75
	Tableau F.2 – Pondérations de <i>DMD</i>	76

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

FIBRES OPTIQUES –

Partie 1-49: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Retard différentiel de mode

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 60793-1-49 a été établie par le sous-comité 86A: Fibres et câbles, du comité d'études 86 de l'IEC: Fibres optiques.

Cette troisième édition annule et remplace la deuxième édition parue en 2006 dont elle constitue une révision technique.

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

- a) un meilleur alignement sur l'objectif initial en remédiant à certaines omissions pour améliorer la rigueur des mesures;

- b) la mesure des fibres avec un plus petit retard différentiel de mode (et une plus grande largeur de bande modale) telles que des fibres de type A1a.3 de l'IEC 60793-2-10 [1]¹ utilisées pour construire des câbles de catégorie de performance OM4, de nouvelles exigences sur la spécification de l'amplitude du détecteur et de la réponse temporelle, les conditions de déploiement des spécimens, le balayage des quatre quadrants et l'uniformité des emplacements radiaux pour calculer la largeur de bande.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

CDV	Rapport de vote
86A/1812/CDV	86A/1860/RVC

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

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

Cette Norme internationale doit être lue conjointement avec l'IEC 60793-1-1:2017.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60793, publiées sous le titre général *Fibres optiques*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

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

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

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

FIBRES OPTIQUES –

Partie 1-49: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Retard différentiel de mode

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60793 s'applique uniquement aux fibres multimodales à cœur en verre à gradient d'indice (catégorie A1). Cette méthode d'essai, qui est généralement utilisée dans les installations de production et de recherche, n'est pas facilement réalisée sur le terrain.

Le présent document décrit une méthode de caractérisation de la structure modale d'une fibre multimodale à gradient d'indice. Cette information est utile pour évaluer les performances de largeur de bande d'une fibre, en particulier lorsque la fibre est destinée à supporter une plage de conditions d'injection, par exemple celles produites par les émetteurs lasers normalisés.

Avec cette méthode, la sortie d'une fibre sonde qui est unimodale à la longueur d'onde d'essai excite la fibre multimodale en essai. Le champ de la sonde balaye la face d'extrémité de la fibre en essai à des positions radiales spécifiées et un ensemble d'impulsions en réponses sont acquises à ces positions.

Trois paramètres spécifiés peuvent être dérivés de l'ensemble de données collecté.

- Le premier paramètre, le retard différentiel de mode (*DMD: Differential Modal Delay*), est la différence de temps de propagation de l'impulsion optique entre les groupes de mode les plus rapides et les plus lents de la fibre en essai. Les spécifications de *DMD* placent des limites sur le retard de mode sur une plage spécifiée de positions de décalage radial d'une fibre sonde. Les spécifications de *DMD* sont déterminées par modélisation et expérimentation pour correspondre à une largeur de bande modale efficace (*EMB: Effective Modal Bandwidth*) minimale pour la gamme d'émetteurs attendue utilisée dans une liaison à un niveau de performance donné.
- Le deuxième paramètre spécifiable est obtenu en combinant les impulsions en utilisant des jeux de pondérations radiales spécifiques pour déterminer une approximation d'un ensemble d'impulsions provenant d'émetteurs typiques. En utilisant des transformées de Fourier, la largeur de bande modale efficace calculée (EMB_c) est déterminée pour chaque jeu de pondérations. Le minimum de ces valeurs d' EMB_c ($minEMB_c$) est le paramètre spécifiable.
- Le troisième paramètre spécifiable, la largeur de bande à injection saturée (*OMB: Overfilled Launch Bandwidth*) calculée, OMB_c , est déterminé de manière semblable à l' EMB_c , mais en appliquant un seul jeu de pondérations à l'ensemble d'impulsions; ce jeu de pondérations correspond à la condition de saturation, où tous les groupes de mode sont uniformément excités.

L'essai a pour objectif de quantifier les effets des interactions de la structure modale d'une fibre et des caractéristiques modales d'une source, à l'exclusion des interactions spectrales de la source avec la dispersion chromatique de la fibre. L'ajout des effets de la dispersion chromatique d'une fibre et de la caractéristique spectrale d'une source réduit la largeur de bande de transmission globale, mais il s'agit d'un calcul séparé dans la plupart des modèles de transmission. Dans cet essai, la contribution de la dispersion chromatique est commandée en limitant la largeur spectrale des sources d'essai utilisables. Dans la pratique, la largeur spectrale des sources d'essai est différente de zéro, ce qui fausse légèrement les valeurs *DMD*, $minEMB_c$ et OMB_c . Ces effets de dispersion chromatiques sont présentés à l'Annexe A.

NOTE Comparaison entre IEC 60793-1-49 et les recommandations UIT: la recommandation UIT-T G.650.1 [2] ne contient aucune information sur la façon de mesurer le *DMD* d'une fibre multimodale à gradient d'indice.

2 Références normatives

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

IEC 60793-1-1:2017, *Optical fibres – Part 1-1: Measurement methods and test procedures – General and guidance* (disponible en anglais seulement)

IEC 60793-1-22, *Fibres optiques – Partie 1-22: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Mesure de la longueur*

IEC 60793-1-41, *Fibres optiques – Partie 1-41: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Largeur de bande*

IEC 60793-1-45, *Fibres optiques – Partie 1-45: Méthodes de mesure et procédures d'essai – Diamètre du champ de mode*

IEC 60825-1, *Sécurité des appareils à laser – Partie 1: Classification des matériels et exigences*

IEC 60825-2, *Sécurité des appareils à laser – Partie 2: Sécurité des systèmes de télécommunication par fibres optiques (STFO)*

IEC 61280-1-4, *Procédures d'essai des sous-systèmes de télécommunications à fibres optiques – Partie 1-4: Sous-systèmes généraux de télécommunication – Méthode de mesure du flux inscrit de la source lumineuse*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

3.1

DMD maximal

DMD maximal apparaissant entre les limites extérieure (R_{OUTER}) et intérieure (R_{INNER}) de position de décalage radial balayées par le champ de la sonde pour un ou plusieurs ensembles de R_{OUTER} et R_{INNER}

3.2

EMB_c minimale

$min EMB_c$

EMB_c minimale parmi les valeurs d' EMB_c calculées à partir d'une séquence de pondération de DMD

Note 1 à l'article: L'utilisateur du présent document peut également spécifier la largeur de bande modale saturée calculée (OMB_c).

3.3

retard différentiel de mode

DMD

différence évaluée des temps de propagation d'une impulsion optique entre le mode le plus rapide et le mode le plus lent excité pour toutes les positions de décalage radial entre R_{INNER} et R_{OUTER} inclus

Note 1 à l'article: L'abréviation "*DMD*" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Differential Modal Delay".

3.4

largeur de bande modale efficace

EMB

largeur de bande associée à la fonction de transfert, $H(f)$, d'une combinaison particulière laser/fibre

Note 1 à l'article: L'abréviation "*EMB*" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Effective Modal Bandwidth".

3.5

largeur de bande modale saturée calculée

OMB_c

largeur de bande associée à la fonction de transfert, $H(f)$, lorsque la fibre est saturée

Note 1 à l'article: L'abréviation "*OMB*" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Overfilled Modal Bandwidth".

3.6

quadrant

section radiale au niveau d'un angle azimutal parmi quatre angles azimutaux possibles sur lesquels un ensemble radial de données d'impulsion peut être collecté

Note 1 à l'article: Par exemple, une section radiale peut provenir d'un des ensembles x positif, x négatif, y positif ou y négatif.

3.7

diamètre du champ de mode

MFD

diamètre du mode émanant de la face d'extrémité d'une fibre unimodale, tel que déterminé par l'IEC 60793-1-45

Note 1 à l'article: L'abréviation "*MFD*" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Mode Field Diameter".

3.8

méthode de texte de référence

RTM

méthode d'essai selon laquelle une caractéristique donnée d'une classe spécifiée de fibres optiques ou de câbles optiques (et composants associés) est mesurée en se conformant rigoureusement à la définition de cette caractéristique et qui donne des résultats exacts, reproductibles et se rapportant à la pratique

Note 1 à l'article: L'abréviation "*RTM*" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Reference Test Method".

3.9

largeur à quart de crête

FWQM

pleine largeur à 25 % de l'amplitude maximale d'une impulsion optique

Note 1 à l'article: L'abréviation "*FWQM*" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Full Width Quarter Maximum".

4 Appareillage

4.1 Vue d'ensemble

L'appareillage doit fournir un moyen permettant d'injecter et de détecter des impulsions de courte durée de rayonnements lumineux créant un champ de petite taille, les impulsions étant injectées à des emplacements connus du cœur de la fibre multimodale à mesurer. Un exemple est représenté dans le schéma de la Figure 1.

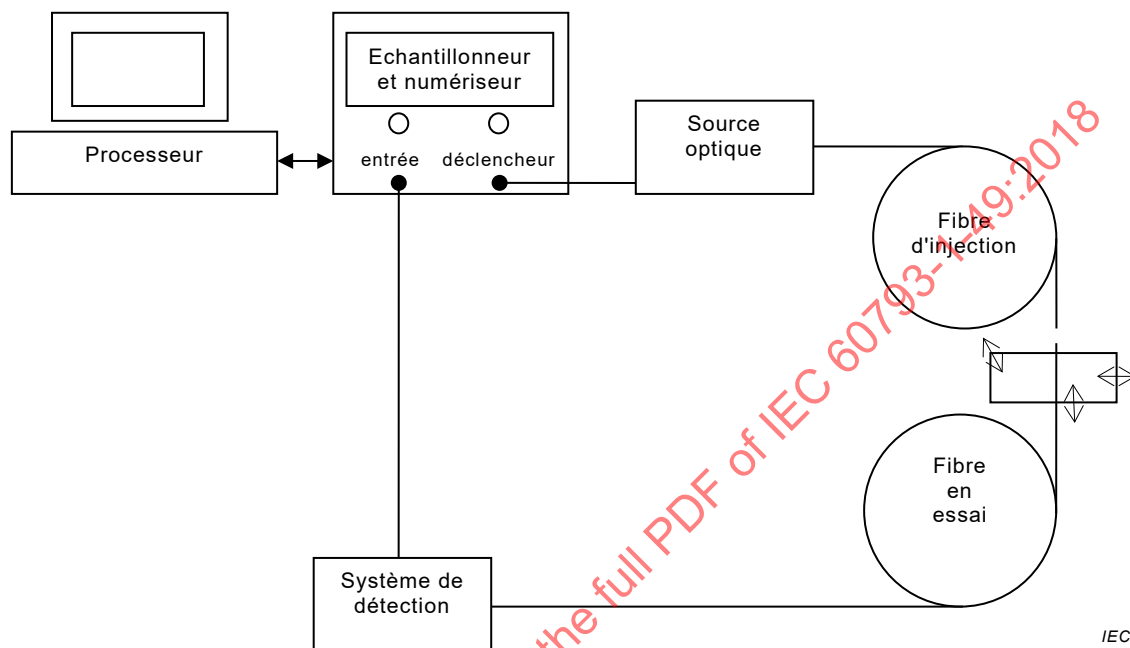


Figure 1 – Exemple d'appareillage

4.2 Source optique

Utiliser une source optique qui injecte des impulsions de courte durée et de largeur spectrale étroite dans la fibre sonde.

L'impulsion optique doit avoir une durée suffisamment courte pour mesurer le temps de propagation différentiel prévu. La durée maximale autorisée pour l'impulsion optique, caractérisée par la pleine largeur à 25 % de l'amplitude maximale (*FWQM*), dépend à la fois de la valeur du *DMD* qui est à déterminer et de la longueur de l'échantillon. Par exemple, si la limite du *DMD* souhaitée normalisée par rapport à la longueur est de 0,20 ps/m pour un échantillon de 500 m de long, le *DMD* à mesurer est 100 ps, la *FWQM* maximale admissible de l'impulsion de sonde est donc ~110 ps. Des essais à la même limite de *DMD* sur une longueur de 10 000 m de fibre exigent la mesure d'un *DMD* de 2 000 ps et donc une impulsion d'une largeur de ~2 200 ps peut être utilisée. Les limites détaillées sont données en 6.1 et peuvent dépendre de la largeur spectrale de la source.

La largeur de la source spectrale doit satisfaire aux exigences de l'Annexe A. L'élargissement induit par la dispersion chromatique provenant de la largeur spectrale de la source est limité par les méthodologies décrites à l'Annexe A. L'exigence concernant la largeur spectrale peut être satisfaite soit en utilisant une source spectralement étroite, soit en utilisant un filtre optique approprié soit au niveau de la source, soit au niveau de l'extrémité de détection. Cette exigence est compliquée lors de la mesure de fibres présentant les performances les plus élevées (dont le *DMD* peut atteindre 0,1 ps/m). Dans ces circonstances, le spectre de la source des impulsions peut être limité par une transformée. Dans ce cas, aucune amélioration ne peut être apportée.

L'exigence sur la longueur d'onde centrale de la source est donnée par les documents de spécification du produit, qui peuvent exiger des mesures à plusieurs longueurs d'onde. Chaque longueur d'onde est considérée dans ce document comme une seule mesure. (Si la spécification ne définit pas de longueur d'onde par défaut pour la mesure du produit, la valeur par défaut 850 nm ± 10 nm doit être utilisée.)

Un laser titane-saphir à mode bloqué, un laser à semiconducteur pulsé ou un laser à fibre optique à mode bloqué sont des exemples de sources appropriées pour cette application.

L'IEC 60825-1 et L'IEC 60825-2 doivent être consultées pour avoir une explication de la sécurité d'utilisation de ces sources.

4.3 Fibre sonde

La source optique doit être couplée à une fibre qui est unimodale à la longueur d'onde de la mesure. Il est exigé que, par conception, cette fibre soit à saut d'indice de manière nominale. Son diamètre de champ de mode (*MFD*) doit donc satisfaire à l'équation suivante:

$$MFD = (8,7\lambda - 2,39) \pm 0,5 \mu\text{m} \quad (1)$$

où

λ est la longueur d'onde de la source en μm .

et le diamètre de champ de mode est déterminé en utilisant l'IEC 60793-1-45.

Cette équation produit un diamètre de champ de mode de 5 μm à 850 nm et de 9 μm à 1 310 nm, ce qui correspond aux fibres unimodales disponibles sur le marché.

S'assurer que la sortie de la fibre sonde est unimodale en limitant la capacité des modes d'ordres plus élevés à se propager. L'enroulement de la fibre sonde autour d'un mandrin d'un diamètre donné est un exemple de dispositif de commande de mode. Un exemple courant est constitué de trois spires autour d'un mandrin de 25 mm de diamètre.

4.4 Dispositif de balayage

Soit la fibre sonde, soit l'échantillon d'essai doit être monté sur un dispositif de balayage capable de balayer l'échantillon d'essai par rapport à la fibre sonde sur tout le diamètre du cœur de l'échantillon d'essai dans les directions x et y . Les actionneurs selon x et y du dispositif de balayage doivent être capables de placer la fibre sonde à 0,5 μm de la position souhaitée. Souvent, le dispositif de balayage est utilisé pour ajuster l'espace entre la fibre sonde et la face d'extrémité de l'échantillon d'essai ou, lorsqu'un système optique est utilisé, pour focaliser l'image du champ de la sonde sur la face d'extrémité de l'échantillon.

L'angle de propagation du faisceau de sortie de la fibre sonde doit être aligné avec l'axe de propagation de l'échantillon d'essai avec une erreur de moins d'un degré.

L'appareil doit utiliser des algorithmes pour centrer de manière reproductible (par rapport au cœur de l'échantillon d'essai) le champ de sortie de la fibre sonde dans la limite de $\pm 1,0 \mu\text{m}$. Le centrage des faces d'extrémité est étudié à l'Annexe B.

4.5 Couplage entre sonde et échantillon d'essai

Dans le cas d'un couplage direct avec l'échantillon d'essai, l'espace entre l'extrémité de sortie de la fibre sonde et la face d'extrémité de l'échantillon d'essai ne doit pas être supérieur à 10 μm . En variante, un système optique en espace libre constitué de lentilles ou de miroirs peut être utilisé pour créer l'image du champ de sortie de la fibre sonde sur la face d'extrémité de l'échantillon d'essai. Lorsqu'un dispositif optique est utilisé, il est exigé que pour chaque position de balayage radial de la mesure, les modes excités dans la fibre en

essai soient essentiellement les mêmes que ceux qui l'auraient été si le faisceau avait été couplé directement à la sortie de la fibre sonde unimodale.

4.6 Extracteur de modes de gaine

Un extracteur de modes de gaine fournit des moyens pour éliminer le rayonnement lumineux de la gaine de l'échantillon d'essai. Le revêtement de la fibre est souvent suffisant pour assurer cette fonction. Sinon, des extracteurs de modes de gaine sont utilisés à proximité des deux extrémités de l'échantillon d'essai. Si la fibre est retenue sur le ou les extracteur(s) de modes de gaine avec de faibles pondérations, des précautions doivent être prises pour éviter toute microcourbure à ces emplacements.

4.7 Système de détection

Utiliser un appareil de détection optique adapté à la longueur d'onde d'essai. L'appareil de détection doit coupler tous les modes guidés de l'échantillon d'essai à la zone active du détecteur. Des amplificateurs et des circuits électroniques de conditionnement de signal peuvent être utilisés, mais des détecteurs photoélectriques PIN polarisés ou des photodiodes en mode avalanche, couplés directement aux circuits électroniques du système d'échantillonnage, sont typiquement utilisés. La non-linéarité combinée de l'amplitude du détecteur et des amplificateurs, et autres circuits électroniques qui lui sont associés, ne doit pas dépasser 5 % sur la plage des signaux attendue. L'oscillation du système détecteur doit être limitée de manière à ce que le dépassement positif ou négatif maximal soit inférieur à 5 % de l'amplitude de crête du signal optique détecté tel qu'il est mesuré sur l'impulsion de référence.

Ces systèmes de détection peuvent présenter des réponses en amplitude qui dépendent du mode. La détermination du *DMD* dépend peu de cette erreur de réponse modale puisque chaque amplitude relative d'impulsion est utilisée pour déterminer la position de ses fronts et flancs arrière. Toutefois, la détermination de l'*EMB_c* et de l'*OMB_c* (définies dans l'IEC 60793-1-41) repose sur les amplitudes des impulsions par rapport à toutes les impulsions dans l'ensemble de données de sorte qu'un détecteur dépendant des modes peut fausser ces mesures. L'Annexe C décrit une méthode pour qualifier des détecteurs dépendants des modes par un balayage de l'uniformité spatiale des détecteurs et par le calcul d'une fonction de couplage, $C(r)$. Il est exigé que la fonction de couplage des détecteurs satisfasse à la relation $0,9 \leq C(r) \leq 1,1$ sur la plage des rayons à mesurer.

4.8 Echantillonneur et numériseur

La forme d'onde du signal optique détecté doit être enregistrée et affichée sur un appareil adapté, par exemple un oscilloscope d'échantillonnage à grande vitesse avec balayage temporel étalonné. Il convient que le système d'enregistrement soit capable de faire la moyenne de la forme d'onde détectée pour des impulsions optiques multiples.

Utiliser un retardateur, par exemple un générateur de retard numérique, pour disposer d'un moyen permettant de déclencher les circuits électroniques de détection au bon moment. Le retardateur peut déclencher la source optique ou être déclenché par la source optique. Le retardateur peut être intégré à l'appareil d'enregistrement ou il peut s'agir d'un dispositif externe.

Lorsque la moyenne est utilisée pour améliorer le rapport signal/bruit (S/B) de la mesure, les statistiques sur la gigue et le dérapage des impulsions de déclenchement peuvent affecter la mesure de diverses manières. Par exemple, en présence d'une gigue importante à haute fréquence, la moyenne de plusieurs impulsions élargit effectivement l'impulsion de la sonde, et les statistiques sur la gigue peuvent dépendre de la quantité de retard utilisée. Le mécanisme de détermination de la moyenne doit être constant pendant la mesure de l'impulsion de référence et des impulsions balayées de sorte que l'impulsion de référence effective reste constante. Certains systèmes de retard présentent des statistiques sur la gigue compliquées et ces effets doivent faire l'objet d'une attention particulière pour assurer de bonnes mesures.

4.9 Appareil de calcul

Cette méthode d'essai exige généralement un ordinateur pour automatiser la procédure, y compris la commande du dispositif de balayage et l'acquisition des formes d'onde le stockage des données intermédiaires et le calcul des résultats d'essai.

4.10 Performance du système

4.10.1 Généralités

La stabilité du système dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel est critique pour assurer des mesures valides et répétables. 4.10 définit une procédure de caractérisation qui doit être effectuée au moment de la mise en service et de l'entretien d'un système de mesure et à intervalles de contrôle réguliers pour assurer que le système de mesure fonctionne comme prévu. Les deux essais commencent par le couplage de la sortie de la fibre sonde dans l'appareil de détection et par l'ajustement de la base de temps et du niveau de signal. Chacun partage les étapes communes suivantes.

- Couplage de l'impulsion directement dans l'appareil de détection en utilisant une des trois méthodes suivantes.
 - La fibre sonde peut être couplée directement à l'appareil de détection.
 - La sortie de la fibre sonde peut être couplée en utilisant une courte longueur de fibre (< 10 m du même type de fibre que la fibre en essai) montée entre le système d'injection et le système de détection.
 - La sortie de la sonde peut être couplée au détecteur par l'intermédiaire d'un système de lentilles et de miroirs.
- Ajustement de l'amplitude de l'impulsion optique pour assurer un bon rapport S/B sans causer de compression du signal dans le récepteur.
- Ajustement de la fenêtre d'échantillonnage du système de détection pour correspondre à la plus petite fenêtre de temps utilisée pour acquérir des données de la gamme prévue d'échantillons d'essai. S'assurer que l'impulsion entière est capturée et la limite de Nyquist est respectée.

Ces caractérisations servent à contrôler la stabilité du système pour s'assurer qu'il est adapté aux mesures. Il convient de réaliser chaque caractérisation pendant un intervalle de temps, T . Il convient que cet intervalle ne soit pas plus court que le temps exigé pour effectuer une mesure sur quatre quadrants à des intervalles de 1 μm pour la moyenne maximale. Pendant l'intervalle de temps T , plusieurs formes d'onde d'impulsions de référence sont acquises et, en calculant les résultats intermédiaires, le paramètre particulier de stabilité est caractérisé. Il convient que le nombre de formes d'onde obtenues pendant l'intervalle de temps T soit approximativement le nombre de formes d'onde obtenues pendant un balayage sur quatre quadrants à des intervalles de 1 μm (c'est-à-dire, 102 échantillons pour une fibre de 50 μm).

4.10.2 Stabilité temporelle des impulsions

Cet essai caractérise les limites temporelles et la stabilité du système.

A chaque temps t , enregistrer la largeur à 25 % ($FWQM$) en utilisant une interpolation linéaire pour améliorer la précision. Enregistrer la $FWQM$ en fonction de l'intervalle de temps T . Déterminer le paramètre de stabilité temporelle, $\Delta FWQM_{\text{stab}}$:

$$\Delta FWQM_{\text{stab}} = 100 \times \frac{FWQM_{\text{MAX}} - FWQM_{\text{MIN}}}{FWQM} \quad (2)$$

où

$\overline{FWQM}$ est la $FWQM$ moyenne sur l'intervalle.

$\Delta FWQM_{stab}$ doit être inférieur à 5 % pour satisfaire à l'exigence sur la stabilité temporelle. Si $\Delta FWQM_{stab}$ se trouve en dehors de cette plage, le système n'est pas qualifié.

4.10.3 Limite de fréquence de stabilité du système

Définir

$$G_{ref}(f) = \frac{FT(R(t))}{FT(R_0(t))} \quad (3)$$

où

R_0 est une impulsion de référence prise au début de la caractérisation;

R est n'importe quelle impulsion de référence suivante;

FT signifie transformée de Fourier.

A chaque temps t , enregistrer R et calculer G_{ref} , puis, pour ce temps t , enregistrer $F_{MAX}(t)$ comme la plus faible fréquence pour laquelle $|G(f)|$ dépasse $1,0 \pm 0,05$. Sur l'intervalle complet, enregistrer le minimum de l'ensemble $F_{MAX}(t)$ comme la limite de fréquence de stabilité du système (*SSFL: System Stability Frequency Limit*) du système.

Il convient d'acquérir R et R_0 en moyennant suffisamment pour réduire le bruit du rapport à moins de 1 % sur la plage de fréquences concernées.

Si $minEMB_c$ ou OMB_c calculées pour une combinaison fibre/laser dépasse la *SSFL*, consigner la valeur de la largeur de bande normalisée comme étant supérieure à la *SSFL* multipliée par la longueur.

5 Echantillonnage et spécimens

5.1 Echantillon d'essai

L'échantillon d'essai doit être une fibre multimodale à cœur en verre à gradient d'indice (catégorie A1).

5.2 Faces d'extrémités du spécimen

Préparer les faces d'extrémité pour qu'elles soient planes au niveau des extrémités d'entrée et de sortie du spécimen. La qualité de la face d'extrémité d'entrée est critique. Les angles des extrémités ne doivent pas être supérieurs à $1,5^\circ$.

5.3 Longueur des spécimens

La longueur de la fibre doit être mesurée en utilisant l'IEC 60793-1-22. La longueur de l'échantillon doit être connue à ± 1 % près. Pour résoudre les litiges, la longueur d'essai de référence doit être spécifiée dans la spécification de produit.

5.4 Déploiement des spécimens

Placer la fibre en essai de telle sorte que les tensions disparaissent et les microcourbures soient réduites au minimum, par exemple sur une bobine de mesure de rayon supérieur ou égal à 150 mm qui génère moins de 5 g de tension de fibre. Le déploiement ne doit pas générer de macrocourbures de rayon inférieur à 40 mm.

La stabilité thermique du spécimen doit satisfaire aux exigences sur la précision de mesure. Ces exigences peuvent être contraignantes pour les fibres de hautes performances. Le coefficient thermique de temps de transit optique pour ces fibres est approximativement

0,035 ps/m·K. Si l'échantillon subit une variation de température de 3 K pendant le temps de la mesure, l'erreur est de 0,1 ps/m, ce qui englobe la spécification entière des fibres de hautes performances.

5.5 Positionnement du spécimen

Positionner l'extrémité d'entrée de l'échantillon d'essai de manière à ce qu'elle soit alignée avec l'extrémité de sortie de la fibre sonde comme décrit en 4.3.

Positionner l'extrémité de sortie de l'échantillon d'essai de manière à ce qu'elle soit alignée avec le système de détection, comme décrit en 6.2 (un centrage soigneux fait partie de la procédure de mesure présentée ci-dessous).

6 Procédure

6.1 Couplage de fibres et réglage du système

Injecter le rayonnement lumineux à partir de la fibre sonde dans la fibre en essai. Régler l'échelle de temps et le temps de déclenchement du système de détection de telle manière que, pour tous les décalages radiaux concernés d'un champ de sonde, les impulsions soient complètement contenues à l'intérieur de la fenêtre de numérisation ("contenues" signifiant que tous les fronts et flancs arrière dont l'amplitude est supérieure ou égale à 1 % de l'amplitude de crête se trouvent à l'intérieur de la fenêtre). Toutes les données de la fibre en essai doivent être obtenues sans réglage supplémentaire du temps de propagation et de l'échelle de temps. L'acquisition d'impulsions de référence peut utiliser des temps de propagation différents, mais elle doit utiliser la même échelle de temps.

6.2 Détermination du centre

Trouver le centre de l'axe optique de la fibre en essai par rapport à la fibre sonde. Des approches pour déterminer le centre de la fibre sont suggérées à l'Annexe B.

6.3 Mesure de l'échantillon d'essai

6.3.1 Choix des rayons et du quadrant

Le choix des rayons et du quadrant est déterminé par deux considérations: l'efficacité de la mesure et la façon dont l'ensemble de données doit être utilisé. Quand des masques de *DMD* sont appliqués aux données, il est exigé que les rayons des points finaux de tous les masques soient inclus dans les points radiaux balayés. En aucun cas, que ce soit pour le *DMD* ou pour l'*EMB_C*, l'espacement radial ne peut être supérieur à 2 µm entre des rayons adjacents. La méthode d'essai de référence (voir 6.5) exige que l'espacement radial nominal soit 1 µm.

Un ou plusieurs quadrants peuvent être balayés. La méthode d'essai de référence (voir 6.5) exige que les quatre quadrants (+*x*, -*x*, +*y* et -*y*) soient balayés. Les données de chaque quadrant doivent être combinées pour produire les résultats calculés conformément à l'Article 7.

Il est nécessaire de ne balayer qu'une seule fois le point radial au centre (0 µm) (cette position est indépendante du quadrant). Toutefois, s'il est balayé plusieurs fois (par exemple une fois sur l'axe *x* et une fois sur l'axe *y*), ces balayages indépendants peuvent être utilisés pour vérifier une détérioration des mesures, par exemple une dérive du système ou des variations induites par la température, de la longueur efficace de la fibre. La comparaison des formes d'onde au même rayon dans différents quadrants peut aider à détecter des détériorations dans la préparation des échantillons, par exemple de mauvais clivages ou des macrocourbures, ou des imperfections des fibres, par exemple une déformation du profil.

6.3.2 Collecte des données de balayage

Mesurer et enregistrer la réponse de l'échantillon d'essai, $u(q,r,t)$, dans l'ensemble de quadrants choisis, q , pour les décalages radiaux choisis, r , en fonction du temps, t , en balayant le champ de sonde sur la face d'extrémité de la fibre et en collectant la forme d'onde associée dans le domaine temporel. Le rapport S/B peut être amélioré en prenant la moyenne.

6.4 Détermination de ΔT_{PULSE} et de ΔT_{REF}

Coupler l'impulsion directement dans l'appareil de détection en utilisant une des trois méthodes décrites: la fibre sonde peut être couplée directement dans l'appareil de détection, ou la sortie de la fibre sonde peut être couplée en utilisant une courte longueur de fibre (< 10 m du même type fibre que la fibre en essai) montée entre le système d'injection et le système de détection, ou la sonde peut être couplée au détecteur par l'intermédiaire d'un système de lentilles et de miroirs.

Mesurer la forme d'onde de l'impulsion optique et l'enregistrer en tant que $u_{\text{ref}}(t)$. Déterminer la largeur temporelle de $u_{\text{ref}}(t)$ à 25 % de l'amplitude de crête, et l'enregistrer en tant que ΔT_{PULSE} . L'interpolation linéaire doit être utilisée entre des points temporels successifs pour calculer ΔT_{PULSE} pour une précision améliorée.

Utiliser l'Annexe A pour calculer une valeur de ΔT_{REF} appropriée aux valeurs de ΔT_{PULSE} , de la largeur spectrale de la source et de la dispersion chromatique de la fibre.

Lors de l'acquisition de l'impulsion de référence, s'assurer que l'échelle de temps du système d'échantillonnage est identique à celle utilisée pour l'acquisition de l'échantillon d'essai.

6.5 Méthode d'essai de référence

La méthode d'essai de référence doit être constituée d'un balayage complet sur quatre quadrants à des intervalles de $1 \mu\text{m}$ sur une longueur d'échantillon de fibre spécifiée par la spécification de produit.

7 Calculs et interprétation des résultats

7.1 Généralités

La largeur de bande modale efficace (*EMB*) minimale d'une fibre est la largeur de bande minimale correspondant à l'excitation des émetteurs conformes aux conditions d'injection définies. Par exemple, l'*EMB* minimale spécifiée dans l'IEC 60793-2-10 est applicable aux conditions d'injection spécifiées dans l'IEC 60793-2-10. L'*EMB* minimale est déterminée en calculant soit le *DMD*, soit l'*EMB* calculée (*EMB_c*) minimale. L'objet de l'un ou l'autre calcul est d'assurer que l'*EMB* de la fibre dépasse les exigences pour toute distribution de puissance de mode (*MPD: Mode Power Distribution*) cohérente avec celle des émetteurs conformes. La conformité des émetteurs peut être définie, par exemple, par des exigences sur les flux inscrits telles que celles qui figurent dans l'IEC 60793-2-10 mesurées selon l'IEC 61280-1-4.

7.2 Retard différentiel de mode (*DMD*)

7.2.1 Généralités

Le retard différentiel de mode est spécifié par un ou plusieurs ensembles de masques indiqués dans la spécification de produit. Ces masques prennent généralement une des deux formes suivantes: un masque fixe qui spécifie un rayon minimal et un rayon maximal sur lesquels les bords sont placés, ou un masque glissant qui spécifie une largeur radiale et un point de début et un point de fin sur lesquels le masque doit être considéré; quand le masque est déplacé sur la plage, l'analyse de la largeur d'impulsion est effectuée, puis le *DMD* du cas le plus défavorable est pris comme valeur à consigner.

7.2.2 Déconvolution

La déconvolution de l'impulsion de référence à partir des impulsions dans l'ensemble de balayage est autorisée, mais facultative.

La déconvolution prend la forme suivante:

$$u'(q,r,t) = FT^{-1} \left[\frac{FT[u(q,r,t)]}{FT[u_{ref}(t)]} FT[f(t)] \right] \quad (4)$$

où

$u(q,r,t)$ est la forme d'onde de l'échantillon dans le quadrant q au rayon r ;

u_{ref} est la forme d'onde de référence;

f est une fonction de filtrage (c'est-à-dire une fonction gaussienne de largeur similaire à ΔT_{PULSE}).

Pour utiliser la déconvolution, l'algorithme ne doit pas introduire d'erreur significative pour les formes d'impulsions rencontrées dans la mesure, en particulier provenant du choix d'un filtre de bruit à haute fréquence, f . Ce processus remplace essentiellement l'impulsion de référence avec la représentation dans le domaine temporel de la fonction de filtrage de sortie, et après la déconvolution, ΔT_{PULSE} devient la pleine largeur à 25 % de la fonction de filtrage. Tandis que des réductions marginales de la largeur d'impulsion peuvent être réalisées par cette approche, il convient généralement de considérer cette technique uniquement pour améliorer d'autres caractéristiques de la forme d'impulsion de la source, par exemple des oscillations ou des asymétries importantes. Noter également qu'une bonne linéarité du détecteur est exigée.

En règle générale, la déconvolution n'est pas exigée, et quand elle n'est pas utilisée, alors $u'(q,r,t) = u(q,r,t)$.

7.2.3 Repliement d'impulsion

Quand plusieurs quadrants sont mesurés, les formes d'onde à des rayons équivalents provenant de chaque quadrant doivent être combinées pour produire une forme d'onde radiale moyenne:

$$u'(r,t) = \frac{\sum_Q u'(q,r,t)}{N(r)} \quad (5)$$

où la somme sur Q signifie combiner, par une somme, point par point, en fonction du temps t , chaque forme d'onde de tous les quadrants, q , au rayon r .

Des formes d'onde de différents quadrants doivent être considérées comme étant au même rayon, si la valeur absolue de la différence de leurs rayons est inférieure à 0,5 μm (en notant également que le rayon est toujours une quantité positive).

La division par $N(r)$ dans l'Equation (5) reconnaît que, pour n'importe quel rayon r , il peut y avoir un nombre différent de formes d'onde à moyenner, comme c'est souvent le cas au rayon zéro.

Lorsqu'un seul quadrant est balayé, $u'(r,t) = u'(q,r,t)$.

7.2.4 Détermination du retard différentiel de mode (DMD)

La spécification de produit exige que le *DMD* soit déterminé pour un ensemble donné de masques radiaux. Les détails de ces masques ne font pas partie du domaine d'application de cette méthode de mesure, mais généralement ces masques spécifient que le *DMD* est déterminé par l'étendue des impulsions sur une fenêtre spécifiée à un rayon intérieur et un rayon extérieur, R_{INNER} et R_{OUTER} . La procédure pour déterminer le *DMD* pour un masque est décrite ci-après. Pour plusieurs masques, la procédure est répétée.

A partir de la forme d'onde $u'(r, t)$, déterminer l'ensemble des fronts et flancs arrière de chaque forme d'onde en fonction du rayon.

- 1) Pour chaque forme d'onde, déterminer le seuil du bord, $E(r)$, à 25 % de la valeur maximale de la forme d'onde à ce rayon:

$$E(r) = 0,25 \times \text{MAX}(u'(r, t)) \quad (6)$$

- 2) Déterminer ensuite le bord rapide et le bord lent de chaque forme d'onde radiale, $T_{\text{FAST}}(r)$ et $T_{\text{SLOW}}(r)$, respectivement. $T_{\text{FAST}}(r)$ est le premier instant auquel la forme d'onde $u'(r, t)$ augmente pour croiser $E(r)$, et $T_{\text{SLOW}}(r)$ est le dernier instant auquel $u'(r, t)$ passe sous $E(r)$. Une interpolation doit être utilisée pour déterminer des valeurs précises de $T_{\text{FAST}}(r)$ et $T_{\text{SLOW}}(r)$.

Considérer le sous-ensemble $u'(r, t)$, où r satisfait à la contrainte:

$$R_{\text{INNER}} - 0,25 \leq r \leq R_{\text{OUTER}} + 0,25 \quad (7)$$

Le *DMD* est déterminé en trouvant le bord le plus rapide et le bord le plus lent à chaque rayon en respectant la contrainte de l'Equation (7):

$$\begin{aligned} T_{\text{FASTEST}} &= \text{MIN}[T_{\text{FAST}}(r)]_{R_{\text{INNER}}}^{R_{\text{OUTER}}} \\ T_{\text{SLOWEST}} &= \text{MAX}[T_{\text{SLOW}}(r)]_{R_{\text{INNER}}}^{R_{\text{OUTER}}} \end{aligned} \quad (8)$$

Pour déterminer le *DMD* en utilisant un masque limité par R_{MIN} et R_{MAX} donnés, l'exigence suivante doit être satisfaite: il existe une forme d'onde, $u'(r, t)$, à r telle que

$$R_{\text{MIN}} - 0,25 \leq r \leq R_{\text{MIN}} + 0,25 \quad (9)$$

et il existe un certain r_{MAX} dans l'ensemble de données tel que

$$R_{\text{MAX}} - 0,25 \leq r_{\text{MAX}} \leq R_{\text{MAX}} + 0,25 \quad (10)$$

Le *DMD* pour l'échantillon de fibre et le masque fixe spécifié est:

$$\text{DMD} = T_{\text{SLOWEST}} - T_{\text{FASTEST}} - \Delta T_{\text{REF}} \quad (11)$$

Si le *DMD* calculé ne satisfait pas à l'inégalité

$$\text{DMD} \geq 0,9 \times \Delta T_{\text{REF}} \quad (12)$$

alors la valeur du *DMD* doit être consignée explicitement comme inférieure à $0,9 \times \Delta T_{\text{REF}}$.

7.3 Largeur de bande modale efficace minimale calculée

7.3.1 Généralités

Le paramètre EMB_c minimale est destiné à représenter la détérioration modale due à la fibre dans une conception de liaison de communication en considérant une plage représentative de conditions d'injection de l'émetteur. L'Annexe E donne des informations de base pour expliquer la façon dont l' EMC_c minimale représente le comportement de ces liaisons, et l'Annexe F présente les fonctions de pondération.

Les calculs suivants concernent l'utilisation des fonctions de pondération, $W(r)$, qui sont dérivées des données de flux inscrits en champ proche des sources laser qui sont caractéristiques des applications. Pour une fibre donnée, l'application de plusieurs fonctions de pondération produit un nombre de valeurs d' EMB_c , dont la valeur minimale est l' EMB_c minimale pour la fibre.

Généralement, les tableaux de fonctions de pondération fournis dans les documents de spécification des produits de fibre sont aux rayons nominaux dans des intervalles de 1 μm . En fonction de la résolution du dispositif de balayage radial et du résultat du centrage de la fibre, le rayon mesuré de n'importe quelle forme d'onde donnée peut être à un rayon légèrement différent du rayon nominal dans le tableau (par exemple 15,2 μm alors que la valeur du tableau est 15 μm). Dans tous les cas, utiliser la valeur de pondération la plus proche du rayon mesuré.

Lorsque des rayons mesurés sont ignorés (c'est-à-dire des mesures à des incréments de 2 μm), alors la valeur de pondération associée et le terme de la somme sont omis.

NOTE L'effet de la dispersion chromatique est étudié à l'Article F.2.

7.3.2 Calcul des impulsions dans le domaine temporel

Pour chaque jeu de pondération $W_i(r)$, où i représente le $i^{\text{ème}}$ jeu de pondération parmi N jeux, calculer une réponse temporelle de sortie qui en résulte, $u_i(t)$, en utilisant les informations d'impulsion de sortie de fibre et une fonction de pondération.

$$u_i(t) = \sum_r W_i(r) u'(r, t) \quad (13)$$

où

$W(r)$ est la fonction de pondération de DMD correspondant à l'émetteur utilisé dans l'application (voir l'Annexe C pour les détails relatifs au calcul de $W(r)$, et voir l'Annexe D pour des exemples de valeurs de $W(r)$ correspondant à une spécification d'injection particulière);

$u'(r, t)$ est l'impulsion de sortie d'un échantillon mesurée à chaque décalage radial r dans les quatre directions en fonction du temps t . Chaque impulsion de sortie est brute (non normalisée en amplitude), après soustraction appropriée du bruit de ligne de base.

7.3.3 Calcul de la fonction de transfert

Réaliser une déconvolution de la réponse temporelle de référence, $u_{\text{ref}}(t)$, à partir de la réponse de sortie qui en résulte, $u_i(t)$, selon la méthode utilisée dans les mesures de largeur de bande décrites dans l'IEC 60793-1-41. Cela donne la réponse fréquentielle de fibre, $U_i(f)$, appelée fonction de transfert de la fibre:

$$U_i(f) = \frac{FT[u_i(t)]}{FT[u_{\text{ref}}(t)]} \quad (14)$$

NOTE Etant donné que la transformée de Fourier donne une matrice de nombres complexes, le quotient de l'Equation (14) donne également une matrice de nombres complexes.

7.3.4 Calcul du spectre de puissance

Déterminer le spectre de puissance logarithmique en décibels:

$$P_i(f) = 5 \times \lg[U_i(f) \times U_{ii}^*(f)] \quad (15)$$

où

$\lg$ est le logarithme en base 10;

$*$ est le conjugué complexe.

7.3.5 Calcul d' EMB_C et de $minEMB_C$

Pour chaque jeu de pondération, calculer la largeur de bande optique à $-1,5$ dB. Elle est déterminée par la fréquence la plus basse où le spectre de puissance P_i est de $1,5$ dB en dessous de la valeur de fréquence zéro. EMB_C est ensuite extrapolée à -3 dB au moyen des hypothèses gaussiennes en la multipliant par $1,414$.

Déterminer $minEMB_C$ en déterminant l' EMD_C minimale sur tous les jeux de pondérations.

NOTE La largeur de bande peut être déterminée par la définition de 3 dB traditionnelle (le premier point auquel la fonction de transfert, $H_{Fib}(f)$ atteint 50% ou 3 dB). Cependant, des réponses hautement non gaussiennes peuvent être produites au moyen d'une fibre réelle et de sources réelles. Pour ces réponses, la valeur à 3 dB mesurée s'est avérée ne pas fournir une bonne corrélation avec la performance du système. La valeur à $1,5$ dB aborde certaines des limites d'une fonction de transfert ondulé et de son effet sur la valeur à -3 dB.

7.4 Normalisation de la longueur

Il peut être souhaitable de normaliser la valeur du DMD ou de l' EMB_C à une longueur unitaire, telle que ps/m ou MHz.km. Si une normalisation à une longueur unitaire est utilisée, la formule concernant la dépendance par rapport à la longueur doit être consignée.

8 Documentation

8.1 Information à consigner

Les informations suivantes doivent être consignées pour chaque essai:

- 1) identification de l'échantillon d'essai;
- 2) longueur de l'échantillon d'essai;
- 3) formule de normalisation de la longueur, si utilisée;
- 4) date de l'essai;
- 5) longueur d'onde source (nominale ou réelle);
- 6) chaque résultat de masque de DMD , y compris les limites des masques (R_{INNER} et R_{OUTER}) et le DMD calculé;
- 7) $minEMB_C$, s'il est calculé, et OMB_C , s'il est calculé.

8.2 Informations disponibles sur demande

Les informations suivantes doivent être disponibles sur demande:

- 1) méthode de mesure utilisée;
- 2) description du matériel d'essai, y compris le type de source et la longueur d'onde centrale de la source réelle, ainsi que la largeur spectrale maximale spécifiée ou réelle (valeur efficace);

- 3) pour la mesure du *DMD*, la documentation de la méthode utilisée pour calculer ΔT_{REF} ; pour l' EMB_c minimale, les caractéristiques de fonction de transfert utilisées pour déterminer la largeur de bande et le jeu des pondérations utilisées;
- 4) décalages radiaux de mesures;
- 5) type de détecteur et conditions de fonctionnement;
- 6) diamètre de champ de mode de la fibre sonde à la longueur d'onde de mesure (nominale ou réelle);
- 7) méthode d'extraction des rayonnements lumineux de la gaine;
- 8) date du dernier étalonnage du matériel d'essai.

9 Informations relatives à la spécification

Lorsque des performances de fibre sont spécifiées en utilisant cette méthode d'essai, les informations suivantes doivent être indiquées:

- 1) nombre et le type d'échantillons à soumettre aux essais;
- 2) procédure d'essai (IEC 60793-1-49);
- 3) longueurs d'onde d'essai;
- 4) pour les exigences sur la *DMD*, valeur de *DMD* exigée pour une plage indiquée de décalages radiaux minimaux et maximaux, $DMD(R_{INNER}, R_{OUTER})$; l'évaluation de plusieurs valeurs différentes de *DMD* pour différentes plages indiquées dans R_{INNER} et R_{OUTER} peut être exigée;
- 5) pour les mesures de *DMD*, option de la méthode de consignation à utiliser selon 7.1;
- 6) pour les exigences d' EMB_c , valeur d' EMB_c minimale exigée;
- 7) pour les exigences d' EMB_c , jeu de pondérations exigé selon l'Annexe C.

Annexe A (normative)

Limite de la largeur spectrale de la source

A.1 Limitation de l'effet de la dispersion chromatique sur la valeur du *DMD*

A.1.1 Généralités

L'effet des erreurs introduites par la dispersion chromatique sur la valeur du *DMD* doit être inférieur à 10 %. Cette exigence peut être satisfaite soit en utilisant une source présentant une largeur spectrale suffisamment faible pour pouvoir ignorer la dispersion chromatique, soit en déterminant de manière précise la forme spectrale de la source et en calculant la valeur appropriée de ΔT_{REF} .

La dispersion chromatique $D(\lambda)$ peut être estimée en utilisant les valeurs limites fournies par la spécification de produit du type de fibre à l'étude. En variante, la dispersion chromatique $D(\lambda)$ la plus défavorable donnée par l'Article A.2 peut être utilisée. L'exigence sur la largeur spectrale peut être satisfaite en utilisant soit une source de spectre étroit, soit un filtre optique à la source ou à l'extrémité de détection. La limite de transformation doit être prise en considération lorsqu'un filtre optique est utilisé parce qu'elle peut élargir temporellement l'impulsion. Ceci est particulièrement vrai pour les sources presque idéales telles que des lasers titane-saphir à mode bloqué.

Plusieurs exemples de méthodes pour satisfaire aux exigences de l'Annexe A sont présentés ci-après.

A.1.2 Limiter la contribution de la dispersion chromatique au *DMD* à mesurer

Utiliser une source de largeur spectrale suffisamment étroite de manière que la valeur de

$$\Delta t_{\text{chrom}} = 4\sqrt{\ln(2)}\delta\lambda D(\lambda)L \quad (\text{A.1})$$

soit inférieure à 10 % du *DMD* à mesurer. Ceci génère une contrainte sur la largeur spectrale efficace $\delta\lambda$:

$$\delta\lambda \leq \frac{DMD_{\min}}{4\sqrt{\ln(2)}D(\lambda)L} \approx 0,030 \frac{DMD_{\min}}{D(\lambda)L} \quad (\text{A.2})$$

Dans ce cas, $DMD_{\min}$ est la valeur la plus faible du *DMD* à déterminer, $D(\lambda)$ est la dispersion chromatique et L est la longueur de l'échantillon. En partant de l'hypothèse typique selon laquelle les retards modaux d'un guide d'ondes suivent linéairement la longueur, cette contrainte ne dépend aucunement de la longueur.

Dans cette condition, utiliser l'approximation $\Delta T_{\text{REF}} = \Delta T_{\text{PULSE}}$ de 6.1 pour calculer la valeur du *DMD*.

EXEMPLE Des valeurs du *DMD* aussi petites que 100 ps sont soumises aux essais sur des longueurs de fibres de 0,5 km à une longueur d'onde de 850 nm. D'après le Tableau A.1, la valeur de $D(\lambda)$ à 850 nm est de 107 ps/nm·km. En plaçant ces données dans les Equations (A.1) et (A.2), la largeur spectrale efficace de la source $\delta\lambda$ sera $\leq (0,03 \times 100 \text{ ps}) / (107 \text{ ps/nm·km} \times 0,5 \text{ km}) = 0,056 \text{ nm}$. La même source conviendrait pour une longueur d'essai de 10 km avec des valeurs de *DMD* d'une valeur aussi faible que 2 000 ps.

A.1.3 Limiter la contribution de la dispersion chromatique à la largeur de référence

Utiliser une source de largeur spectrale suffisamment étroite qui, en ignorant Δt_{chrom} par rapport à ΔT_{PULSE} , modifie la valeur de ΔT_{REF} de moins de 10 %. Ceci génère une contrainte sur la largeur spectrale efficace $\delta\lambda$,

$$\delta\lambda \leq \frac{\sqrt{0,21}\Delta T_{\text{PULSE}}}{4\sqrt{\ln(2)}D(\lambda)L} \approx 0,138 \frac{\Delta T_{\text{PULSE}}}{D(\lambda)L} \quad (\text{A.3})$$

Utiliser $\Delta T_{\text{REF}} = \Delta T_{\text{PULSE}}$ de 6.1 et pour le calcul de la valeur du *DMD*.

Dans ce cas, il n'y a pas de dépendance explicite entre la largeur spectrale de la source $\delta\lambda$ et la valeur du *DMD* mesurée. A la place, la valeur minimale du *DMD* qui peut être mesurée est fixée directement par ΔT_{PULSE} . Noter qu'il existe une dépendance explicite entre la largeur spectrale maximale autorisée et la longueur d'échantillon. Pour une largeur spectrale fixée, l'élargissement chromatique devient trop important pour être ignoré au-delà d'une certaine longueur d'échantillon.

EXEMPLE Une source laser particulière et un détecteur optique ayant la valeur $\Delta T_{\text{PULSE}} = 60$ ps sont utilisés pour mesurer des échantillons de 0,5 km à 850 nm. En plaçant ces données dans l'Equation (A.3), la largeur spectrale efficace de la source $\delta\lambda$ sera $\leq (0,138 \times 60 \text{ ps}) / (107 \text{ ps/nm}\cdot\text{km} \times 0,5 \text{ km}) = 0,15 \text{ nm}$.

A.1.4 Ajuster ΔT_{REF} pour tenir compte de la contribution de la dispersion chromatique

Calculer la valeur appropriée de ΔT_{REF} pour la source utilisée. ΔT_{REF} est la pleine largeur à 25 % de chaque mode à la sortie de la fibre en essai. Pour une impulsion et des formes spectrales quasi gaussiennes, utiliser l'Equation (A.4):

$$\Delta T_{\text{REF}} = (\Delta T_{\text{PULSE}}^2 + \Delta t_{\text{chrom}}^2)^{1/2} \quad (\text{A.4})$$

Dans ce cas, la limite supérieure sur la largeur spectrale de la source est fixée indirectement par l'exigence de 7.1 indiquant que la valeur minimale du *DMD* consignée par la mesure est de $0,9(\Delta T_{\text{REF}})$.

Si une source a des crêtes spectrales multiples ou si elle est suffisamment non gaussienne, l'Equation (A.4) peut s'avérer imprécise. D'autres équations peuvent être utilisées si elles représentent précisément l'élargissement d'impulsion induit par la dispersion, ou si l'élargissement chromatique attendu peut être déterminé expérimentalement (en fonction de la longueur de fibre), alors les données expérimentales peuvent être utilisées directement. Dans tous les cas, lorsque ΔT_{PULSE} est corrigé pour que la dispersion produise une évaluation de ΔT_{REF} , l'erreur introduite dans le calcul du *DMD* doit être inférieure à 10 %.

A.1.5 Fibres de *DMD* hautes performances et exigences spectrales

Pour les fibres de très hautes performances (c'est-à-dire 850 nm, 0,1 ps/m), l'exigence sur la largeur spectrale est proche de la limite de ce qui est physiquement possible. Par exemple, un laser titane-saphir à mode bloqué a une impulsion de forme proche d'une impulsion sécante hyperbolique carrée limitée par transformée, dont le produit temps $\times$ largeur de bande vaut $\sim 0,315$. Si ce type de laser est souhaité pour mesurer 300 m de fibre de 0,1 ps/m (30 ps de *DMD*), la largeur d'impulsion de ce laser ne peut pas être supérieure à une *FWQM* de 33 ps, ce qui équivaut à une *FWHM* de ~ 22 ps. L'utilisation du produit temps $\times$ largeur de bande signifie que l'impulsion est physiquement limitée à une largeur spectrale supérieure à $\sim 14,3$ GHz ($0,315/22$ ps), c'est-à-dire 0,034 nm à 850 nm. En multipliant 0,034 nm avec la dispersion chromatique de 107 ps/nm $\cdot$ km et la longueur de 0,3 km donne une contribution de dispersion chromatique de 1 ps, ou une erreur de 3,3 %.

L'exemple ci-dessus part de l'hypothèse que le système de détection n'élargit pas l'impulsion, et que la largeur temporelle du laser est la largeur limite. Dans un système de hautes performances typique, le composant limiteur est habituellement le détecteur, et le laser a une largeur temporelle réelle bien plus petite que la largeur d'impulsion observée sur le système d'échantillonnage. Les valeurs typiques pour ces types de lasers sont une *FWHM* de 10 ps, ce qui signifie que le laser ne peut pas être plus étroit que 0,075 nm, ce qui donne une erreur de dispersion chromatique de ~7 %. Si le laser n'a pas une impulsion de forme proche d'une impulsion limitée par transformée, il est encore plus large.

A.2 Dispersion chromatique dans les fibres multimodales

Les données du Tableau A.1 représentent la dispersion la plus élevée attendue pour toutes les fibres de la catégorie A1 disponibles sur le marché, sur la base de la performance de dispersion nominale et de l'ouverture numérique (NA). A des longueurs d'onde inférieures à 1 200 nm, la dispersion est plus importante avec une fibre de λ_0 maximale (fibre à 0,29 d'ouverture numérique). A des longueurs d'onde supérieures à 1 400 nm, la dispersion est plus importante avec une fibre de λ_0 minimale (fibre à 0,20 d'ouverture numérique). Ici, λ_0 est la longueur d'onde à dispersion nulle. Le Tableau A.1 n'est pas utilisé pour des longueurs d'onde comprises entre 1 200 nm et 1 400 nm. Utiliser à la place $D = 16,6$ ps/nm·km.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60793-1-49:2018

Tableau A.1 – Dispersion chromatique la plus défavorable

λ (nm)	D (ps/nm·km)	λ (nm)	D (ps/nm·km)	λ (nm)	D (ps/nm·km)
780	146				
790	140				
800	133	1 000	54,2	1 400	8,28
810	128	1 010	51,8	1 410	9,08
820	122	1 020	49,2	1 420	9,85
830	117	1 030	46,9	1 430	10,6
840	112	1 040	44,7	1 440	11,4
850	107	1 050	42,5	1 450	12,1
860	102	1 060	40,3	1 460	12,8
870	98,0	1 070	38,2	1 470	13,5
880	93,7	1 080	36,2	1 480	14,2
890	89,7	1 090	34,3	1 490	14,9
900	85,7	1 100	32,4	1 500	15,6
910	82,1	1 110	30,6	1 510	16,2
920	78,4	1 120	28,9	1 520	16,9
930	75,0	1 130	27,2	1 530	17,5
940	71,6	1 140	25,5	1 540	18,1
950	68,6	1 150	23,9	1 550	18,8
960	65,5	1 160	22,4	1 560	19,4
970	62,5	1 170	20,8	1 570	20,0
980	59,6	1 180	19,4	1 580	20,6
990	57,0	1 190	17,9	1 590	21,1
				1 600	21,7
Hypothèses: – pour $\lambda < 1\,200$ nm: $S_0 = 0,095\,62$ ps/(nm ² ·km); $\lambda_0 = 1\,344,5$ nm pour une fibre multimodale nominale d'ouverture numérique de 0,29. – pour $\lambda > 1\,400$ nm: $S_0 = 0,101$ ps/(nm ² ·km); $\lambda_0 = 1\,310$ nm pour une fibre multimodale nominale d'ouverture numérique de 0,20 NA.					

Annexe B (informative)

Détermination du centre optique d'une fibre

B.1 Généralités

Avant la collecte des balayages de *DMD*, le centre de la fibre doit être connu puisque, comme cela est défini par le présent document, les formes d'onde du *DMD* sont un ensemble collecté de formes d'onde de réponse d'impulsions en fonction des coordonnées radiales d'une fibre multimodale symétrique par rapport à l'azimut. Si un balayage axial est réalisé avec une référence de centre incorrecte, la détermination du *DMD*, de l'*EMB_c* et de l'*OMB_c* peut être fortement erronée. Ainsi, la détermination du centre de la fibre est critique pour le dispositif de balayage du *DMD*.

Après avoir monté la fibre dans l'appareil de mesure, son centre de balayage n'est pas connu. L'emplacement de la fibre peut être commandé avec une certaine précision en prenant comme référence la surface de la gaine, mais le centre optique du cœur ne peut pas être commandé avec une précision suffisante en prenant comme seule référence la surface extérieure de la gaine. Le diamètre de la gaine, la concentricité cœur/gaine et la différence entre le centre du cœur, déterminé par exemple à l'aide d'un microscope vidéo, et le dispositif de balayage de *DMD*, sont tous des exemples d'erreurs trop importantes pour déterminer les coordonnées correctes du centre. Le présent document exige qu'un ensemble de formes d'onde préliminaires soit analysé pour déterminer le centre des axes *x* et *y*. Ce centre est utilisé pour indiquer les coordonnées de balayage pour toutes les formes d'onde utilisées dans la détermination du *DMD*.

B.2 Méthode

Le centre de l'axe du *DMD* est trouvé en intégrant des formes d'onde individuelles au rayon *r* en fonction du temps (la zone) comme un signal (qui est proportionnel à l'énergie des impulsions émanant de la fibre).

$$v(r) = \int_0^T V(r,t) dt \quad (\text{B.1})$$

La zone est enregistrée en fonction des positions axiales du dispositif de balayage et l'ensemble de zones est utilisé pour déterminer le centre axial. Un ensemble typique de zones en fonction de la position est représenté dans la Figure B.1.