

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Measurement method of half-wavelength voltage for Mach-Zehnder optical modulator in wireless communication and broadcasting systems

Méthode de mesure de la tension à une demi-longueur d'onde relative aux modulateurs optiques Mach-Zehnder dans les systèmes de communication et transmission radiofréquence



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2020 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

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

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

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

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Measurement method of half-wavelength voltage for Mach-Zehnder optical modulator in wireless communication and broadcasting systems

Méthode de mesure de la tension à une demi-longueur d'onde relative aux modulateurs optiques Mach-Zehnder dans les systèmes de communication et transmission radiofréquence

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 33.060.20; 33.180.99

ISBN 978-2-8322-8761-3

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

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms, definitions, symbols and abbreviated terms.....	7
3.1 Terms and definitions.....	7
3.2 Symbols and abbreviated terms	8
4 Electro-optic material based Mach-Zehnder optical modulator	9
4.1 Mach-Zehnder optical modulator.....	9
4.1.1 Component parts	9
4.1.2 Structure	9
4.2 Requirements for Mach-Zehnder optical modulator	10
4.2.1 General	10
4.2.2 Substrate material	10
4.2.3 Optical waveguide design	10
5 Sampling for quality control	10
5.1 Sampling.....	10
5.2 Sampling frequency	10
6 Measurement method of half wavelength voltage.....	10
6.1 Circuit diagram	10
6.2 Measurement conditions	11
6.2.1 Temperature and environment.....	11
6.2.2 Warming up of measurement equipment.....	11
6.3 Principle of measurement method.....	12
6.3.1 General	12
6.3.2 Measurement principle.....	12
6.4 Measurement procedure	14
6.4.1 General	14
6.4.2 Circuit diagram (Type A).....	15
6.4.3 Circuit diagram (Type B).....	16
Annex A (normative) Conventional measurement method of optical modulation index.....	18
A.1 Overview.....	18
A.2 Circuit diagram	18
A.3 Measurement procedure	19
A.3.1 Spectrum analyser method	19
A.3.2 Oscilloscope method	19
Annex B (informative) Calculation method of intermodulation distortions using driving voltage and half-wavelength voltage of Mach-Zehnder optical modulator	20
B.1 Overview.....	20
B.2 Explanation of calculation method.....	20
B.3 Conventional measurement methods of intermodulation distortion	26
B.3.1 General	26
B.3.2 Circuit diagram	26
B.3.3 Precautions to be observed	27
B.3.4 Measurement procedures	27
Annex C (informative) Characteristics of Mach-Zehnder optical modulator.....	29

C.1	Electrical and optical characteristics of Mach-Zehnder optical modulator	29
C.2	Mechanical and environmental characteristics	29
Annex D (informative)	Notes on measurement	31
D.1	Factors of measurement uncertainty	31
D.1.1	Measurement equipment	31
D.1.2	Measurement range	32
D.2	RF power source	33
D.2.1	Limitation from resolution of applied RF power	33
D.2.2	Limitation from the resolution of oscilloscope screen	34
D.3	Examples of measurement results	34
Bibliography		37
Figure 1	– Transfer curve of a Mach-Zehnder optical modulator	8
Figure 2	– Structure of Mach-Zehnder interferometer type optical modulator	9
Figure 3	– Schematic block diagram of the measurement setup	11
Figure 4	– Zero-order Bessel function	13
Figure 5	– Waveform change on the oscilloscope screen	13
Figure 6	– Driving voltage measurement setup	15
Figure 7	– Driving voltage measurement setup using a power divider	16
Figure 8	– Waveforms on the oscilloscope	17
Figure A.1	– Measurement setup referred in IEC 62007-2	18
Figure A.2	– Time variation of photo current	19
Figure B.1	– Mach-Zehnder interferometer type optical modulator	20
Figure B.2	– Quadrature points of a transfer curve for a Mach-Zehnder optical modulator	25
Figure B.3	– Dependency of IM2 on NOMI and bias voltage of a Mach-Zehnder optical modulator	25
Figure B.4	– Relation between IM3 and OMI of a Mach-Zehnder optical modulator	26
Figure B.5	– Conventional intermodulation method	27
Figure B.6	– IMD2 and IMD3	28
Figure D.1	– Errors of half-wavelength voltage measurements caused by limitations from the resolution of RF power	33
Figure D.2	– Relative errors of half-wavelength voltage measurement caused by limitations from the resolution of RF power	34
Figure D.3	– Relation between NOMI and IM3 for the Mach-Zehnder modulator (sample #1)	35
Figure D.4	– Relation between NOMI and IM3 for the Mach-Zehnder modulator (sample #2)	36
Figure D.5	– Relation between NOMI and IM2 for the Mach-Zehnder modulator (sample #1)	36
Table 1	– Symbols and abbreviated terms	9
Table C.1	– Characteristics of optical modulator	29
Table C.2	– Mechanical and environmental characteristics	30
Table D.1	– Spectrum analyser uncertainty	31
Table D.2	– Uncertainty budget of power meter at only 2 GHz	32
Table D.3	– Measurement results of half-wave voltages for Mach-Zehnder modulators	35

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MEASUREMENT METHOD OF HALF-WAVELENGTH VOLTAGE FOR MACH-ZEHNDER OPTICAL MODULATOR IN WIRELESS COMMUNICATION AND BROADCASTING SYSTEMS

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 62801 has been prepared by IEC technical committee 103: Transmitting equipment for radiocommunication.

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

CDV	Report on voting
103/120/CDV	103/133/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.

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

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62801:2020

INTRODUCTION

A variety of microwave-photonic devices may be used in wireless communication and broadcasting systems. An optical modulator is an interface which converts an electronic signal to an optical signal. In the field of optical fibre communication systems, the first editions of the IEC 62007 series "Semiconductor optoelectronic devices for fibre optic system applications" were published in 1997. In the field of wireless systems, specifications of intermodulation and composite distortion of modulators have been the important issue and have been typically negotiated between users and suppliers. During the International Meeting on Microwave Photonics, a proposal was announced to address standardizations for key devices for radio-over-fibre (RoF) systems.

An RoF system is comprised mainly of two parts; one is the RF to photonic converter (E/O), and the other is the photonic to RF converter (O/E). Radio waves are converted into an optical signal at E/O, and the signal is transferred through the optical fibre, and then the radio waves are regenerated at O/E. The nonlinear distortion characteristics of both E/O and O/E are important for the performance of the system. Semiconductor photodiodes are commonly used for O/E. Several types of optical modulator are used for E/O, such as Mach-Zehnder modulators (MZM), electro-absorption modulators and directly modulated laser diodes (LDs).

This document has been prepared to provide industry standard measurement methods for evaluating electro-optic material based Mach-Zehnder optical modulators, to be used in wireless communication and broadcasting systems. The nonlinear distortion characteristics are also important for the performance of the systems. The intermodulation distortion of the MZM is calculated from the driving voltage and the half-wavelength voltage. The details of calculations of the second-order intermodulation distortion (IM2) and the third-order intermodulation distortion (IM3) are described in Annex B. General characteristics of Mach-Zehnder optical modulators in wireless communication and broadcasting systems are described in Annex C. Notes on measurement of the half-wavelength voltage are described in Annex D.

The International Electrotechnical Commission (IEC) draws attention to the fact that it is claimed that compliance with this document may involve the use of a patent. IEC takes no position concerning the evidence, validity, and scope of this patent right.

The holder of this patent right has assured IEC that s/he is willing to negotiate licences under reasonable and non-discriminatory terms and conditions with applicants throughout the world. In this respect, the statement of the holder of this patent right is registered with IEC. Information may be obtained from the patent database available at <http://patents.iec.ch>.

Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this document may be the subject of patent rights other than those in the patent database. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

MEASUREMENT METHOD OF HALF-WAVELENGTH VOLTAGE FOR MACH-ZEHNDER OPTICAL MODULATOR IN WIRELESS COMMUNICATION AND BROADCASTING SYSTEMS

1 Scope

This document specifies a measurement method of half-wavelength voltage applicable to Mach-Zehnder optical modulators in wireless communication and broadcasting systems. In addition, this method is also effective for the estimation of the intermodulation distortion of Mach-Zehnder optical modulators. The method applies for the following:

- frequency range: 10 MHz to 30 GHz;
- wavelength band: 0,8 μm to 2,0 μm ;
- electro-optic material based Mach-Zehnder optical modulators and their modules.

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 62007-1, *Semiconductor optoelectronic devices for fibre optic system applications – Part 1: Essential ratings and characteristics*

IEC 62007-2, *Semiconductor optoelectronic devices for fibre optic system applications – Part 2: Measurement methods*

3 Terms, definitions, symbols and abbreviated terms

3.1 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 62007-1 and IEC 62007-2 and the following 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>

3.1.1

half-wavelength voltage

V_{π}

voltage required for a Pockels effect material based Mach-Zehnder optical modulator to induce a phase shift of one-half a wavelength between the lightwaves of two arms of the Mach-Zehnder interferometer

Note 1 to entry: It corresponds to an ON/OFF voltage of the Mach-Zehnder optical modulator as shown in Figure 1

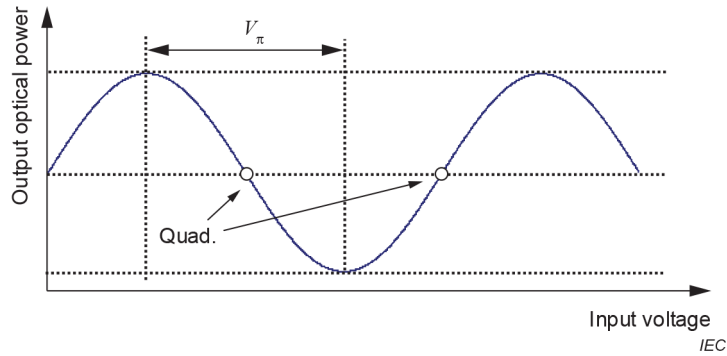


Figure 1 – Transfer curve of a Mach-Zehnder optical modulator

3.1.2

normalized optical modulation index

NOMI

for the Mach-Zehnder optical modulator, ratio of driving voltage and half-wavelength voltage of the modulator, defined as

$$\text{NOMI} = (V_{pp} / V_{\pi}) \times 100 [\%] \quad (1)$$

where

V_{pp} is the driving voltage (peak to peak voltage);

V_{π} is the half-wavelength voltage

Note 1 to entry: NOMI does not denote actual optical modulation index (OMI), defined as the ratio of the optical modulated signal power and the average optical power. Detailed explanations of OMI including measurement methods are described in Annex A.

Note 2 to entry: This note applies to the French language only.

3.1.3

extinction ratio

R_{ext}

ratio of two optical power levels of the optical signal generated by the optical modulator, defined as

$$R_{\text{ext}} = 10\log(P_1/P_2) \quad (2)$$

where

P_1 is the optical power level generated when the output power is "on";

P_2 is the power level generated when the output power is "off"

3.2 Symbols and abbreviated terms

The symbols and abbreviated terms used in this document are shown in Table 1.

Table 1 – Symbols and abbreviated terms

R_{ext}	extinction ratio
V_{π}	half-wavelength voltage
CSO	composite second-order distortion
CTB	composite triple-beats distortion
DUT	device under test
ESA	electrical spectrum analyser
IMD	intermodulation distortion
IM2	second-order intermodulation distortion
IM3	third-order intermodulation distortion
LD	laser diode
MZM	Mach-Zehnder modulator
NOMI	normalized OMI
OMI	optical modulation index
PD	photodiode
RoF	radio-over-fibre

4 Electro-optic material based Mach-Zehnder optical modulator

4.1 Mach-Zehnder optical modulator

4.1.1 Component parts

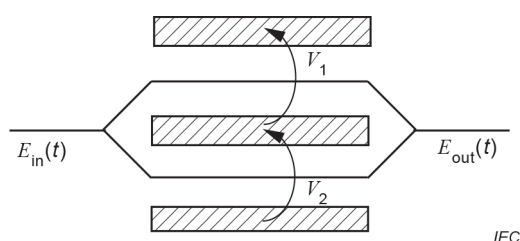
The optical modulators and their modules consist of basic parts as follows:

- Mach-Zehnder interferometer type optical modulator;
- input and output fibre pigtails (where appropriate);
- bias control port (where appropriate);
- photodiode for bias monitoring (where appropriate);
- laser diode for light source (where appropriate);
- thermal sensor (where appropriate);
- Peltier element (where appropriate).

4.1.2 Structure

A basic structure of the Mach-Zehnder interferometer type optical modulators is shown in Figure 2. The modulators are grouped by electrode types and options.

- Electrode: lumped type, traveling-wave type, etc.
- Options: optical isolator, photodiode, half-mirror, laser diode, etc.



IEC

Figure 2 – Structure of Mach-Zehnder interferometer type optical modulator

4.2 Requirements for Mach-Zehnder optical modulator

4.2.1 General

This method is based on the theoretical transfer curve of the electro-optic material based Mach-Zehnder interferometer, where the phase shift of traveling light on each arm of the interferometer should be proportional to the applied voltage, and the power of traveling lightwaves in each arm are almost the same. Requirements for this measurement method and applicable for the modulator are given in 4.2.2 and 4.2.3.

4.2.2 Substrate material

The main substrate materials of the modulator shall be materials such as LiNbO_3 , LiTaO_3 , KH_2PO_4 , PZT, PLZT, InP, GaAs, InGaAs, InAlAs, InGaAsP, CLD type chromophore containing polymer, FTC type chromophore containing polymer, etc., which realize an electro-optic effect (Pockels effect). If strictly considered, semiconductor materials do not possess a pure electro-optic effect, however, the semiconductor Mach-Zehnder modulators can be adjudged as electro-optic material based Mach-Zehnder modulators.

4.2.3 Optical waveguide design

The optical waveguide shall be designed as a single Mach-Zehnder interferometer type comprised of two Y-junctions or symmetric directional couplers and parallel waveguides. Reflection type Mach-Zehnder optical modulators are included.

5 Sampling for quality control

5.1 Sampling

A statistically significant sampling plan shall be agreed upon by the user and supplier. Sampled devices shall be randomly selected and representative of production population, and shall satisfy the quality assurance criteria using the proposed test methods.

5.2 Sampling frequency

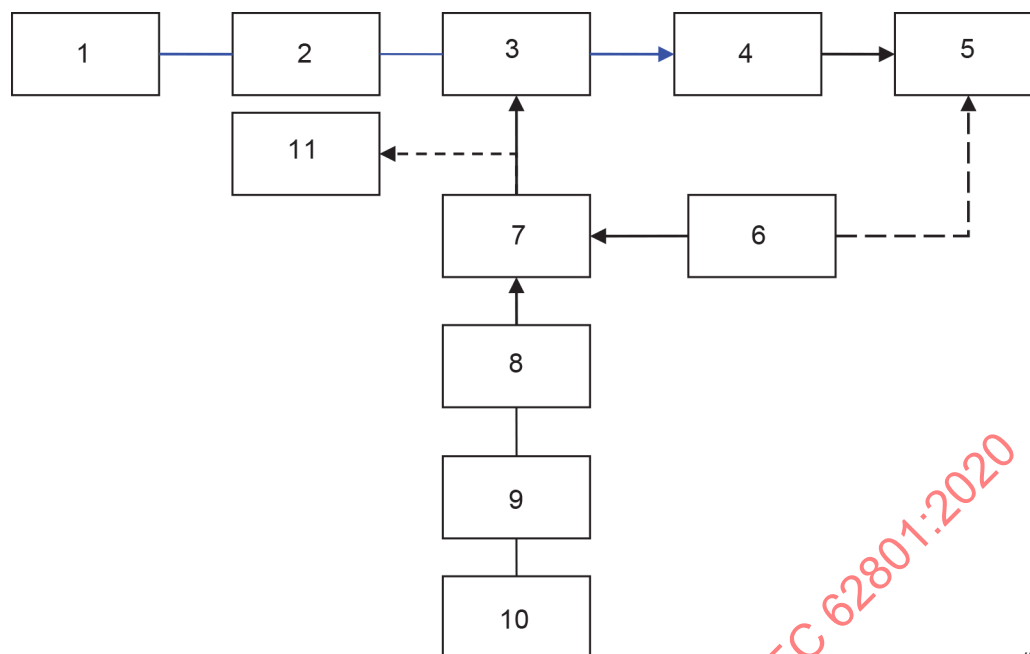
Appropriate statistical methods shall be applied to determine adequate sample size and acceptance criteria for the considered lot size. In the absence of more detailed statistical analysis, the following sampling plan can be employed.

Half wavelength voltage: two units at least per manufacturing lot.

6 Measurement method of half wavelength voltage

6.1 Circuit diagram

See Figure 3 for the circuit description and requirements.



IEC

Key

- 1 Laser diode
- 2 Polarization controller
- 3 Device under test
- 4 Photodiode
- 5 Oscilloscope
- 6 Monitor signal Source (SG2)
- 7 Bias tee
- 8 (Step) attenuator
- 9 Microwave amplifier
- 10 Microwave signal source (SG1)
- 11 Power meter or spectrum analyser (during measurement)

Figure 3 – Schematic block diagram of the measurement setup**6.2 Measurement conditions****6.2.1 Temperature and environment**

The measurement should be carried out in a room with a temperature ranging from 5 °C to 35 °C. If the operation temperature ranges of the measurement apparatuses are narrower than the above range, the specifications of the measurement apparatuses should be followed. It is desirable to control the measurement temperature within ± 5 °C in order to suppress the influence of the temperature drift of measurement apparatuses to a minimum. The temperature of the DUT can be changed using a temperature controller, as necessary, to verify the temperature dependence of the measured parameters, for example.

6.2.2 Warming up of measurement equipment

The warming-up time shall be kept to typically 60 min, or the time written in the specifications of the measurement equipment or systems. Moreover, the warming up time should be taken to be the longest among all of the measurement equipment.

6.3 Principle of measurement method

6.3.1 General

The method for measuring the half-wavelength voltage (AC half-wavelength voltage) of a Mach-Zehnder type optical modulator is described here. In this method, the half-wavelength voltages of Mach-Zehnder type optical modulators can be measured accurately without depending on the bias voltage of an optical modulator. When the input RF signal to the modulator is set to such a specific level that the zero-order Bessel functions can be zero, the average optical output power of the modulator becomes constant regardless of the bias voltage. By measuring the input RF power or voltage at this condition, the half-wavelength voltage, V_π , is determined. This measurement can be achieved through a wide frequency range, though it needs a high-voltage signal source (of about 1,5 times V_π).

6.3.2 Measurement principle

The optical output power of MZ modulators is given by

$$I = \frac{I_0}{2} [1 + \cos(\Phi_1 + \Phi_2)] \quad (3)$$

$$\Phi_1 = \frac{\pi V_{pp}}{2V_\pi} \sin(2\pi ft) \quad (4)$$

$$\Phi_2 = \text{const} \quad (5)$$

where Φ_1 and Φ_2 are the phase change caused by the high-frequency RF signal and that due to the bias voltage, respectively. V_π is the half-wavelength voltage at the RF signal frequency f , V_{pp} is the peak to peak voltage amplitude of the high-frequency wave, and I_0 is the maximum optical output power. The time average power of I , I' is calculated by

$$\begin{aligned} I' &= f \int_0^{1/f} \frac{I_0}{2} [1 + \cos(\Phi_1 + \Phi_2)] dt \\ &= f \int_0^{1/f} \frac{I_0}{2} [1 + \cos \Phi_1 \cos \Phi_2 - \sin \Phi_1 \sin \Phi_2] dt \end{aligned} \quad (6)$$

After some calculation from Equation (6), we obtain:

$$\begin{aligned} I' &= f \int_0^{1/f} \frac{I_0}{2} \left[1 + \cos \left\{ \frac{\pi V_{pp}}{2V_\pi} \sin(2\pi ft) \right\} \cos \Phi_2 - \sin \left\{ \frac{\pi V_{pp}}{2V_\pi} \sin(2\pi ft) \right\} \sin \Phi_2 \right] dt \\ &= f \int_0^{1/f} \frac{I_0}{2} \left[1 + \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n \cos(2n \cdot 2\pi ft) J_{2n} \left\{ \frac{\pi V_{pp}}{2V_\pi} \right\} \cos \Phi_2 - \sum_{n=0}^{\infty} 2 \sin\{(2n+1)2\pi ft\} J_{2n+1} \left\{ \frac{\pi V_{pp}}{2V_\pi} \right\} \sin \Phi_2 \right] dt \quad (7) \\ &= \frac{I_0}{2} \left[1 + J_0 \left(\frac{\pi V_{pp}}{2V_\pi} \right) \cos \Phi_2 \right] \end{aligned}$$

where

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1 & \dots n = 0 \\ 2 & \dots n \neq 0 \end{cases}$$

When the input RF signal is tuned so that the relation $\pi V_{pp \min} / (2 V_{\pi}) = 2,405$ can be satisfied, the zero-order Bessel term in Equation (7) becomes zero, and the time average of the optical output power becomes constant. As shown in Figure 4, there are many voltage amplitudes at which the AC component of I' goes to zero. $V_{pp \min}$ denotes the lowest one of them.

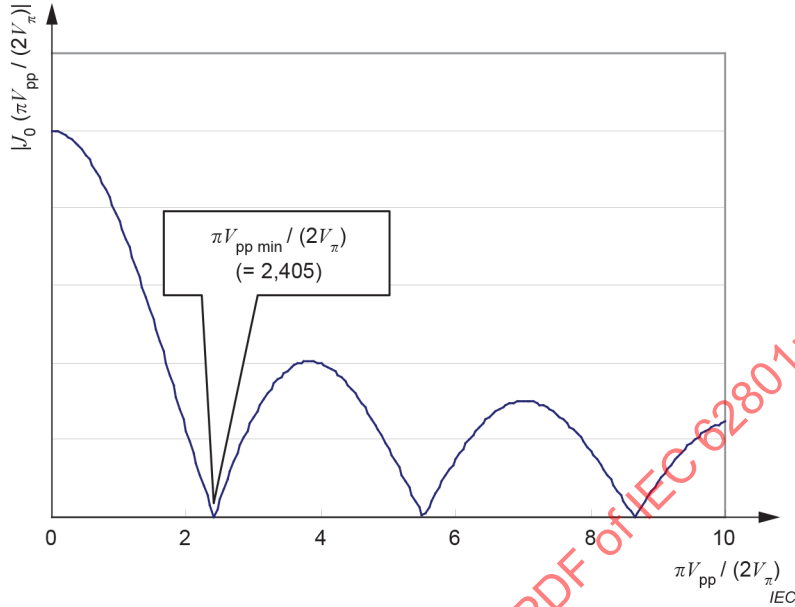


Figure 4 – Zero-order Bessel function

The schematic block diagram of the measurement setup is shown in Figure 3. In order to find easily the state where the optical output is constant, a low frequency signal for monitor (SG2) is superimposed on the RF signal. By adjusting the RF voltage amplitude of the high-frequency signal (SG1), the condition can be observed where the monitor signal (SG2) amplitude shows the minimum value. At this condition, the wave form of the monitor signal is observed as a flat line on the screen of the oscilloscope. V_{π} at the frequency of SG1 can be calculated from the measured result of $V_{pp \min}$ using the following relation.

$$V_{\pi} = \frac{\pi V_{pp \min}}{2 \times 2,405} = \frac{\pi \cdot 20(10^{(P_{S1/10-3})})^{1/2}}{2 \times 2,405} \quad (8)$$

According to this method, the half-wavelength voltage V_{π} of a Mach-Zehnder type optical modulator can be measured easily by measuring the minimum value $V_{pp \min}$ of the voltage amplitude of the high-frequency AC signal when the intensity change of an output lightwave related to the monitoring low-frequency AC signal is almost zero, as shown in Figure 5. In addition, if the frequency for testing is a high frequency, because there is no need to observe the high-frequency waveform directly, accurate measurement is possible, and at the same time, because this is not a measurement method which depends on a bias point, there is no need to adjust the bias point, and there is no effect from bias point variation of the optical modulator.

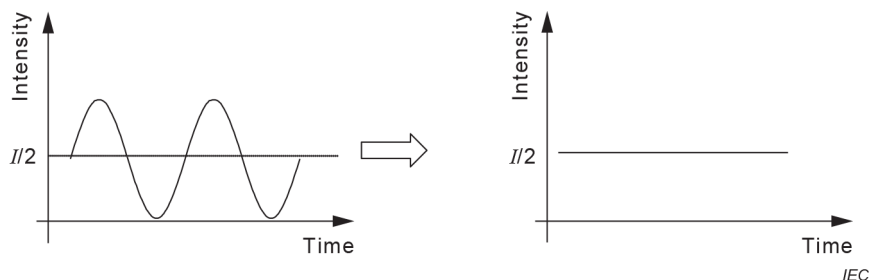


Figure 5 – Waveform change on the oscilloscope screen

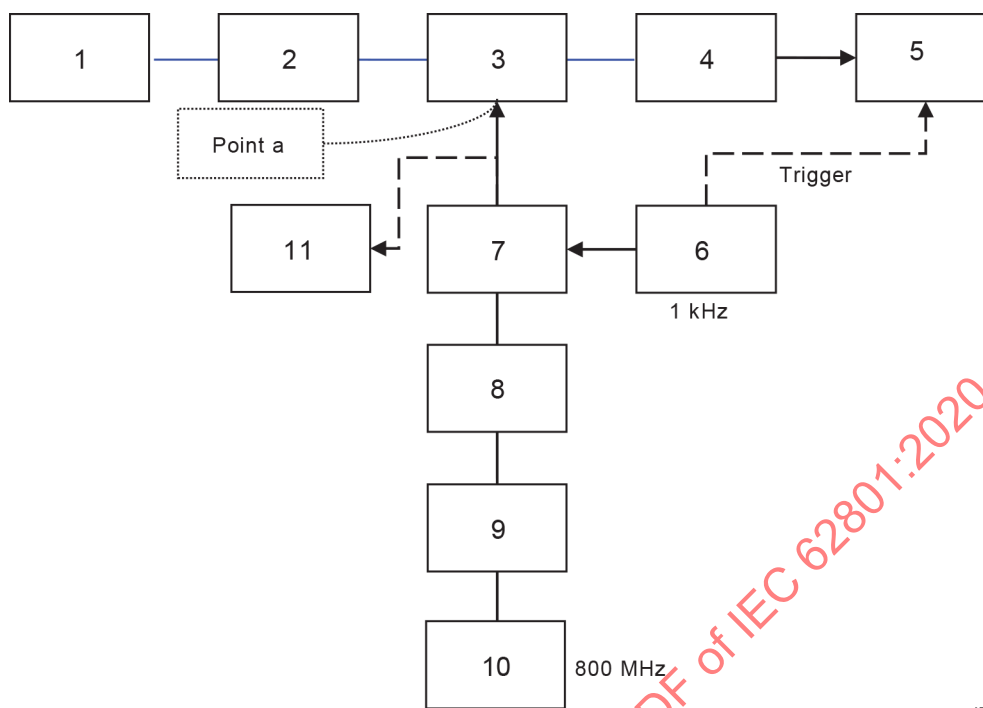
6.4 Measurement procedure

6.4.1 General

- STEP 1) The measurement setup is prepared as shown in Figure 6.
- STEP 2) For measuring the minimum value $V_{pp \min}$, the output signals of SG1 and SG2 (abbreviated to S1 and S2, respectively) are set as follows:
 S1 (initial setting conditions);
 Frequency: measurement frequency of driving voltage (800 MHz, 801 MHz, etc);
 Output power: ≤ 0 dBm ($0,6 V_{pp}$) at Point a;
 S2 (initial setting conditions);
 Frequency: 1-tone to be selected from the range of 1 kHz to 2 MHz;
 Output power: $\leq 1 V_{pp}$ to $5 V_{pp}$ at Point a.
- STEP 3) The DC voltage applied to the LN modulator can be controlled both manually and automatically (it is not necessary to adjust the DC voltage).
- STEP 4) The waveform of Ch2 detected by the PD is displayed in the oscilloscope. The overlapped waveform of Ch1 is also simultaneously displayed.
- STEP 5) When the power of S1 is continuously increased, the amplitude of Ch2 modulated by the S2 element periodically becomes almost zero (see Figure 8). The first S1 power (at Point a) to make the amplitude almost zero is measured by the power meter and V_{π} is calculated.
- The half wavelength voltage can be obtained from the measured S1 power (at Point a), P_{S1} , by using the following formula.

$$V_{\pi} = \frac{\pi V_{pp \min}}{2 \times 2,405} = \frac{\pi \cdot 20(10^{(P_{S1}/10-3)})^{1/2}}{2 \times 2,405}$$

NOTE The modified circuit diagram is shown in Figure 7. In this case, a power divider is used instead of an attenuator and re-connection to the modulator and to the power meter is not required for measurement of the RF-power of Point a. The power of Point a is calibrated according to the power ratio between Point a and Point b.

6.4.2 Circuit diagram (Type A)

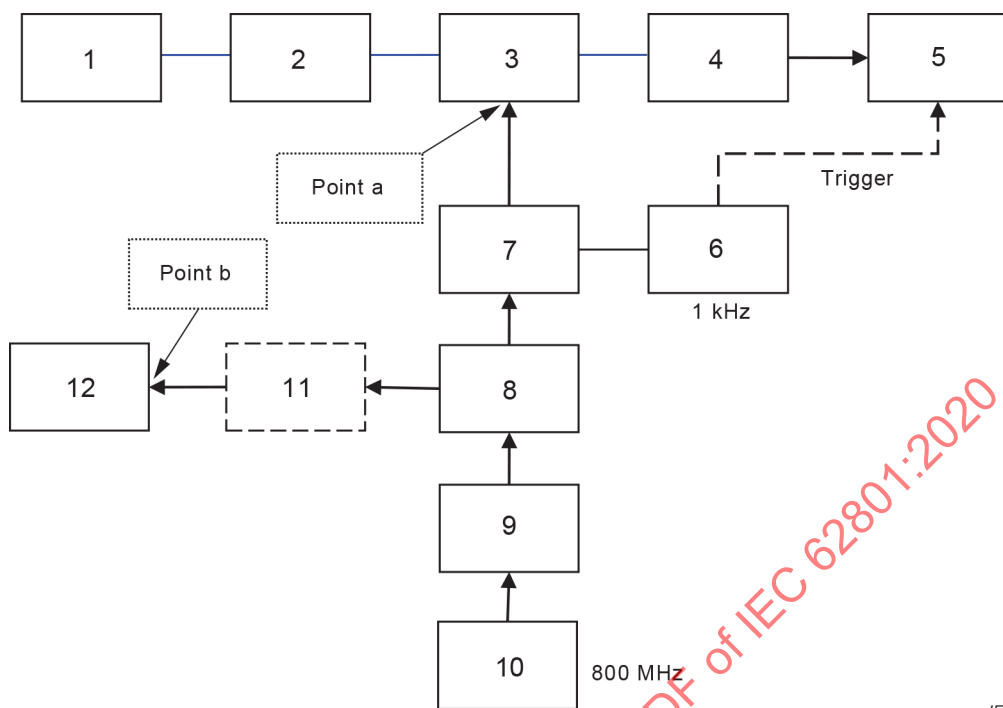
IEC

Key

- 1 Laser diode
- 2 Polarization controller
- 3 Device under test
- 4 Photodiode
- 5 Oscilloscope
- 6 Signal source (LF)
- 7 Bias tee
- 8 Step attenuator
- 9 Microwave amplifier
- 10 Microwave signal source
- 11 Power meter (during measurement)

Figure 6 – Driving voltage measurement setup

6.4.3 Circuit diagram (Type B)

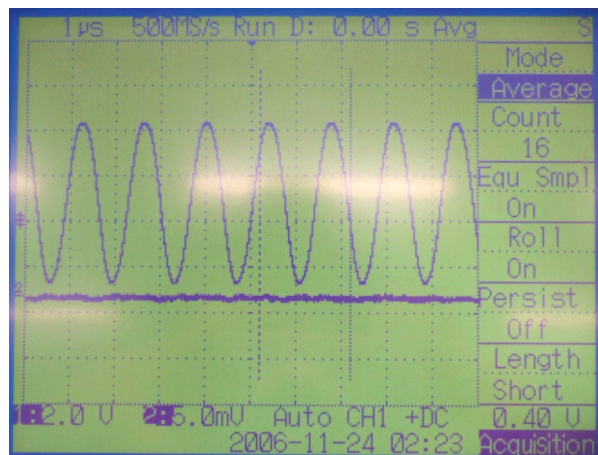


IEC

Key

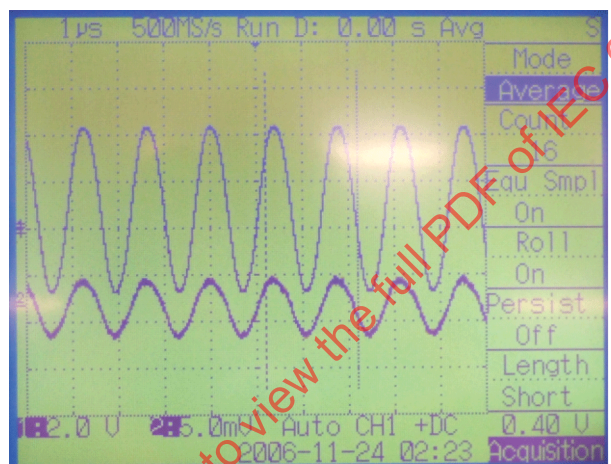
- 1 Laser diode
- 2 Polarization controller
- 3 Device under test
- 4 Photodiode
- 5 Oscilloscope
- 6 Signal source (LF)
- 7 Bias tee
- 8 Power divider
- 9 Microwave amplifier
- 10 Microwave signal source
- 11 Attenuator (if necessary)
- 12 Power meter

Figure 7 – Driving voltage measurement setup using a power divider



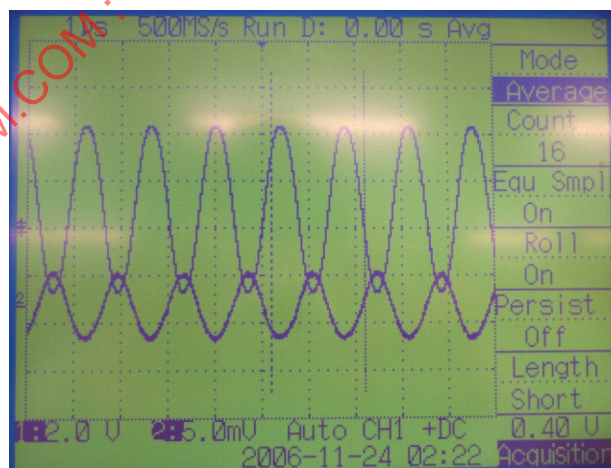
IEC

a) Amplitude of the optical signal almost zero



IEC

b) Optical signal modulated in phase with S2 element



IEC

c) Optical signal modulated in opposite phase with S2 element

Figure 8 – Waveforms on the oscilloscope

Annex A (normative)

Conventional measurement method of optical modulation index

A.1 Overview

Annex A describes generic measurement methods of the optical modulation index (OMI) of an analogue optical modulator under specified modulation conditions. Detailed information is included in IEC 62007-2.

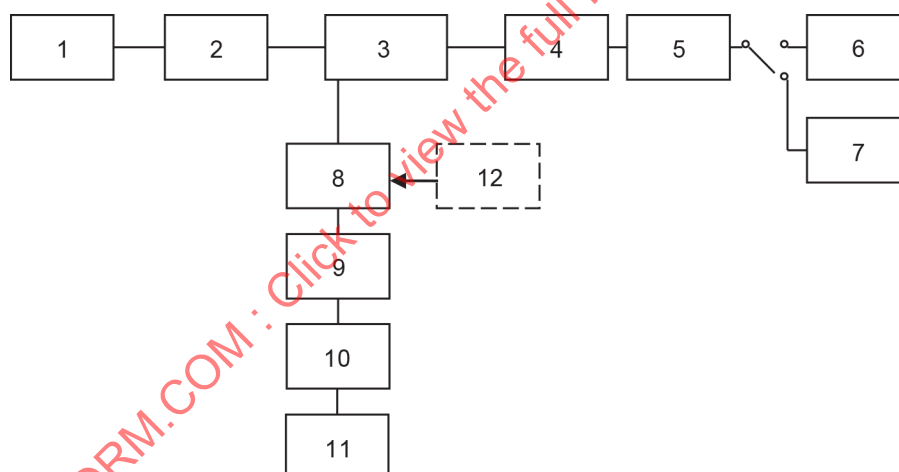
For the Mach-Zehnder optical modulator, normalized OMI (NOMI) is defined in the following formula:

$$\text{NOMI} = (V_{\text{pp}} / V_{\pi}) \times 100 [\%]$$

and easily obtained by calculation from the measurement result of the half-wavelength voltage.

A.2 Circuit diagram

See Figure A.1 for the circuit description and requirements.



IEC

Key

- 1 Laser diode
- 2 Polarization controller
- 3 Device under test
- 4 Photodiode
- 5 DC block
- 6 Oscilloscope
- 7 Power meter
- 8 Bias tee
- 9 (Step) attenuator
- 10 Microwave amplifier
- 11 Microwave signal source (RF1)
- (12 DC bias source)

Figure A.1 – Measurement setup referred in IEC 62007-2

A.3 Measurement procedure

A.3.1 Spectrum analyser method

A device under test is modulated with a single RF frequency by signal source, S_k . The optical output is coupled to the detector input. The detector is appropriately biased with the DC source. A current meter is used to measure the average photocurrent I_{ph} . The detector is impedance matched to the measurement equipment. The signal current amplitude can be determined from the power P at one of the modulation frequencies detected by the spectrum analyser or at the RF power meter.

The optical modulation index can be calculated with:

$$OMI = (2 P_w / R)^{1/2} / I_{ph} \quad (A.1)$$

where

P_w is the detected electrical power in watts;

R is the load resistor in ohm (matched to the impedance of the spectrum analyser or power meter);

I_{ph} is the average photocurrent in amperes.

A.3.2 Oscilloscope method

An optical modulator is modulated with a single RF frequency by signal source, S_k . The impedance matched photodiode (PD) is now DC-coupled to an oscilloscope through R . As illustrated in Figure A.2, The transfer curve of the modulator can be observed. The optical modulation index can be calculated by Formula (A.2).

$$OMI = (i_{max} - i_{min}) / (i_{max} + i_{min}) = i / i_{av} \quad (A.2)$$

where

i_{max} is the maximum signal current (per carrier);

i_{min} is the minimum signal current;

i is the signal current amplitude;

i_{av} is the average signal current.

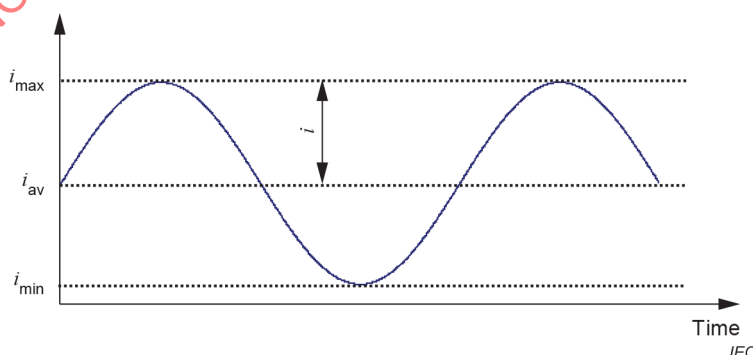


Figure A.2 – Time variation of photo current

In this method, an oscilloscope corresponding to the signal frequency is required. The photodiode (PD) should correspond to the signal frequency. The input optical power to the PD should be kept within the linear response range of the PD.

Annex B (informative)

Calculation method of intermodulation distortions using driving voltage and half-wavelength voltage of Mach-Zehnder optical modulator

B.1 Overview

Annex B shows the method of calculating the amount of intermodulation from the optical modulation index defined as the ratio of driving voltage and half-wavelength voltage for the Mach-Zehnder optical modulator. For reference, conventional measurement methods of the second-order intermodulation distortion (IM2) and the third-order intermodulation distortion (IM3) of optical modulators under specified modulation conditions are shown.

B.2 Explanation of calculation method

When the amount of optical modulation index (OMI) is calculated from the half-wavelength voltage measurement results, the intermodulation distortion (IMD) of the Mach-Zehnder optical modulator can be obtained. The details of calculations of second-order intermodulation distortion (IM2) and third-order intermodulation distortion (IM3) are described hereafter.

The multi carrier signals are input to a Mach-Zehnder optical modulator as shown in Figure B.1.

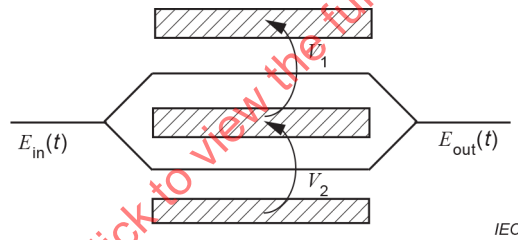


Figure B.1 – Mach-Zehnder interferometer type optical modulator

The signal voltages, V_1 and V_2 , are expressed as;

$$V_1 = V_{DC1} + \sum_{k=1}^N v_{RF} \sin(\omega_k t + \phi_{RF1}) \quad (B.1)$$

$$V_2 = V_{DC2} + \sum_{k=1}^N v_{RF} \sin(\omega_k t + \phi_{RF2}) \quad (B.2)$$

$$(k = 1, 2, \dots, N)$$

where V_{DC1} , V_{DC2} are the input DC voltage to optical modulator, v_{RF} is a magnitude of input RF signal, ω_k is an angular frequency of k^{th} channel in the FDM signal, and ϕ_{RF1} , ϕ_{RF2} are the initial phase of input RF signal. ϕ_{RF1} and ϕ_{RF2} have the following relationship:

$$\phi_{RF2} = \phi_{RF1} + \pi \quad (B.3)$$

The input optical carrier to optical modulator is assumed as

$$E_{\text{in}}(t) = \sqrt{2P_{\text{in}}} e^{j(\omega_0 t)} \quad (\text{B.4})$$

where P_{in} is the optical input power to optical modulator and ω_0 is the angular frequency of the optical input signal. Thus the optical output signal is expressed as

$$E_{\text{out}}(t) = \sqrt{P_{\text{in}} L_{\text{opt}}} \left[e^{j\{\omega_0 t + \phi_1 + v(t)\}} + e^{j\{\omega_0 t + \phi_2 + v'(t)\}} \right] \quad (\text{B.5})$$

where L_{opt} is the optical loss of optical modulator, and

$$\phi_1 = \frac{\pi}{2} \frac{V_{\text{DC1}}}{V_{\pi\text{DC}}} \quad (\text{B.6})$$

$$\phi_2 = \frac{\pi}{2} \frac{V_{\text{DC2}}}{V_{\pi\text{DC}}} \quad (\text{B.7})$$

$$v(t) = m \sum_{k=1}^N \sin(\omega_k t + \phi_{\text{RF1}}) \quad (\text{B.8})$$

$$v'(t) = m \sum_{k=1}^N \sin(\omega_k t + \phi_{\text{RF2}} + \pi) = -m \sum_{k=1}^N \sin(\omega_k t + \phi_{\text{RF2}}) \quad (\text{B.9})$$

where m is the induced optical phase due to the RF input signal. When the $E_{\text{out}}(t)$ is detected by the PD with its responsivity, r , the output current of the PD is given by

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{r}{2} |E_{\text{out}}(t)|^2 \\ &= \frac{1}{2} r P_{\text{in}} L_{\text{opt}} \left[2 + e^{j\{\phi_1 - \phi_2 + 2v(t)\}} + e^{j\{\phi_1 - \phi_2 + 2v'(t)\}} \right] \\ &= r P_{\text{in}} L_{\text{opt}} [1 + \cos(2v(t) + \Delta\phi)] \\ &= r P_{\text{in}} L_{\text{opt}} \left[1 + \text{Re} \left[e^{j \left\{ 2m \sum_{k=1}^N \sin(\omega_k t + \phi_{\text{RF1}}) + \Delta\phi \right\}} \right] \right] \\ &= r P_{\text{in}} L_{\text{opt}} \left[1 + \text{Re} \left[e^{j \left\{ 2m \sum_{k=1}^N \sin\theta_k(t) \right\}} e^{j(\Delta\phi)} \right] \right] \end{aligned} \quad (\text{B.10})$$

where

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (\text{B.11})$$

$$\theta_k(t) = \omega_k t + \phi_{\text{RF1}} \quad (\text{B.12})$$

and

$$\begin{aligned}
 e^{j\left\{2m \sum_{k=1}^N \sin \theta_k(t)\right\}} &= \prod_{k=1}^N e^{j\{2m \sin \theta_k(t)\}} \\
 &= \prod_{k=1}^N \left[\sum_{n_k=-\infty}^{\infty} J_{n_k}(2m) e^{jn_k \theta_k(t)} \right] \\
 &= \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \sum_{n_2=-\infty}^{\infty} \cdots \sum_{n_N=-\infty}^{\infty} J_{n_1}(2m) J_{n_2}(2m) \cdots J_{n_N}(2m) e^{j \sum_{k=1}^N n_k \theta_k(t)}
 \end{aligned} \tag{B.13}$$

Thus, Equation (B.10) is

$$\begin{aligned}
 i(t) &= rP_{\text{in}} L_{\text{opt}} \left[1 + \left[\text{Re} \left[e^{j\Delta\varphi} \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \sum_{n_2=-\infty}^{\infty} \cdots \sum_{n_N=-\infty}^{\infty} J_{n_1}(2m) J_{n_2}(2m) \cdots J_{n_N}(2m) e^{j \sum_{k=1}^N n_k \theta_k(t)} \right] \right] \right] \\
 &= rP_{\text{in}} L_{\text{opt}} \left[1 + \text{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \sum_{n_2=-\infty}^{\infty} \cdots \sum_{n_N=-\infty}^{\infty} J_{n_1}(2m) J_{n_2}(2m) \cdots J_{n_N}(2m) e^{j \sum_{k=1}^N n_k (\omega_k t + \varphi_{\text{RF}1})} \right] \right]
 \end{aligned} \tag{B.14}$$

The fundamental component in the h^{th} channel is:

$$\begin{aligned}
 n_k &= \begin{cases} \pm 1 & \text{for } n_h \\ \text{otherwise} & 0 \end{cases} \\
 i_{1\text{st}}(t) &= rP_{\text{in}} L_{\text{opt}} \text{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-1} \left\{ J_1(2m) e^{j(\omega_h t + \varphi_{\text{RF}1})} + J_{-1}(2m) e^{-j(\omega_h t + \varphi_{\text{RF}1})} \right\} \right] \\
 &= rP_{\text{in}} L_{\text{opt}} \text{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-1} J_1(2m) \left\{ e^{j(\omega_h t + \varphi_{\text{RF}1})} - e^{-j(\omega_h t + \varphi_{\text{RF}1})} \right\} \right] \\
 &= -2rP_{\text{in}} L_{\text{opt}} \{J_0(2m)\}^{N-1} J_1(2m) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \sin(\omega_h t + \varphi_{\text{RF}1})
 \end{aligned} \tag{B.15}$$

The second harmonic component in the h^{th} channel is:

$$\begin{aligned}
 n_k &= \begin{cases} \pm 2 & \text{for } n_h \\ \text{otherwise} & 0 \end{cases} \\
 i_{2\text{HD}}(t) &= rP_{\text{in}} L_{\text{opt}} \text{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-1} \left\{ J_2(2m) e^{j(2\omega_h t + 2\varphi_{\text{RF}1})} + J_{-2}(2m) e^{-j(2\omega_h t + 2\varphi_{\text{RF}1})} \right\} \right] \\
 &= rP_{\text{in}} L_{\text{opt}} \text{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-1} J_2(2m) \left\{ e^{j(2\omega_h t + 2\varphi_{\text{RF}1})} + e^{-j(2\omega_h t + 2\varphi_{\text{RF}1})} \right\} \right] \\
 &= 2rP_{\text{in}} L_{\text{opt}} \{J_0(2m)\}^{N-1} J_2(2m) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \cos(2\omega_h t + 2\varphi_{\text{RF}1})
 \end{aligned} \tag{B.16}$$

The third harmonic component in h^{th} channel is:

$$n_k = \begin{cases} \pm 3 & \text{for } n_h \\ \text{otherwise} & 0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} i_{3\text{HD}}(t) &= rP_{\text{in}}L_{\text{opt}} \operatorname{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-1} \left\{ J_3(2m)e^{j(3\omega_h t + 3\varphi_{\text{RF}1})} + J_{-3}(2m)e^{-j(3\omega_h t + 3\varphi_{\text{RF}1})} \right\} \right] \\ &= rP_{\text{in}}L_{\text{opt}} \operatorname{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-1} J_3(2m) \left\{ e^{j(3\omega_h t + 3\varphi_{\text{RF}1})} - e^{-j(3\omega_h t + 3\varphi_{\text{RF}1})} \right\} \right] \\ &= -2rP_{\text{in}}L_{\text{opt}} \{J_0(2m)\}^{N-1} J_3(2m) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \sin(3\omega_h t + 3\varphi_{\text{RF}1}) \end{aligned} \quad (\text{B.17})$$

Intermodulation distortion components of the second-order generated by 2-tone signals are:

$$n_k = \begin{cases} \pm 1 & \text{for } n_h \\ \mp 1 & \text{for } n_i \\ \text{otherwise} & 0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} i_{\text{IM}2}(t) &= -rP_{\text{in}}L_{\text{opt}} \operatorname{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-2} \{J_1(2m)\}^2 \left\{ e^{j(\omega_h - \omega_i)t} + e^{-j(\omega_h - \omega_i)t} \right\} \right] \\ &= -2rP_{\text{in}}L_{\text{opt}} \{J_0(2m)\}^{N-2} \{J_1(2m)\}^2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \cos\{(\omega_h - \omega_i)t\} \end{aligned} \quad (\text{B.18})$$

Intermodulation distortion components of the third-order generated by 2-tone signals are:

$$n_k = \begin{cases} \pm 2 & \text{for } n_h \\ \mp 1 & \text{for } n_i \\ \text{otherwise} & 0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} i_{\text{IM}3}(t) &= rP_{\text{in}}L_{\text{opt}} \operatorname{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-2} J_2(2m)J_{-1}(2m)e^{j\{(2\omega_h - \omega_i)t + \varphi_{\text{RF}1}\}} + \{J_0(2m)\}^{N-2} J_{-2}(2m)J_1(2m)e^{-j\{(2\omega_h - \omega_i)t + \varphi_{\text{RF}1}\}} \right] \\ &= rP_{\text{in}}L_{\text{opt}} \operatorname{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-2} J_2(2m)J_1(2m) \left[e^{j\{(2\omega_h - \omega_i)t + \varphi_{\text{RF}1}\}} - e^{-j\{(2\omega_h - \omega_i)t + \varphi_{\text{RF}1}\}} \right] \right] \\ &= 2rP_{\text{in}}L_{\text{opt}} \{J_0(2m)\}^{N-2} J_2(2m)J_1(2m) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \sin\{(2\omega_h - \omega_i)t + \varphi_{\text{RF}1}\} \end{aligned} \quad (\text{B.19})$$

Intermodulation distortion components of the third-order generated by 3-tone signals are:

$$n_k = \begin{cases} \pm 1 & \text{for } n_h \quad n_i \\ \mp 1 & \text{for } n_l \\ \text{otherwise} & 0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} i_{\text{TB}}(t) &= -rP_{\text{in}}L_{\text{opt}} \operatorname{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-3} \{J_2(2m)\}^3 \left\{ e^{j\{(\omega_h + \omega_i - \omega_j)t + \varphi_{\text{RF}1}\}} - e^{-j\{(\omega_h + \omega_i - \omega_j)t + \varphi_{\text{RF}1}\}} \right\} \right] \\ &= 2rP_{\text{in}}L_{\text{opt}} \{J_0(2m)\}^{N-3} \{J_2(2m)\}^3 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \sin\{(\omega_h + \omega_i - \omega_j)t + \varphi_{\text{RF}1}\} \end{aligned} \quad (\text{B.20})$$

From Equations (B.15) to (B.20), the power ratios of fundamental to distortion components are:

$$\text{2nd harmonics} = \left(\frac{\text{2nd harmonic component}}{\text{fundamental component}} \right)^2 = \left\{ \frac{J_2(2m)}{J_1(2m)} \tan^{-1}(\varphi_1 - \varphi_2) \right\}^2 \quad (\text{B.21})$$

$$\text{3rd harmonics} = \left(\frac{\text{3rd harmonic component}}{\text{fundamental component}} \right)^2 = \left\{ \frac{J_3(2m)}{J_1(2m)} \right\}^2 \quad (\text{B.22})$$

$$\text{IM2} = \left(\frac{\text{2nd order IMD}}{\text{fundamental component}} \right)^2 = \left\{ \frac{J_1(2m)}{J_0(2m)} \tan^{-1}(\varphi_1 - \varphi_2) \right\}^2 \quad (\text{B.23})$$

$$\text{IM3} = \left(\frac{\text{third order IMD}}{\text{fundamental component}} \right)^2 = \left\{ \frac{J_2(2m)}{J_0(2m)} \right\}^2 \quad (\text{B.24})$$

$$\text{Triplebeat} = \left(\frac{\text{triple beat component}}{\text{fundamental component}} \right)^2 = \left\{ \frac{J_1(2m)}{J_0(2m)} \right\}^4 \quad (\text{B.25})$$

Here, normalized optical modulation index (NOMI) is redefined as:

$$\text{NOMI} = v_{\text{RF}}/v_{\pi\text{RF}} \times 100 \text{ [\%]}$$

where v_{RF} is a driving voltage and $v_{\pi\text{RF}}$ is a half-wavelength voltage for the signal frequency.

The power ratio of fundamental component to distortion components are expressed as the functions of NOMI,

$$\text{2nd harmonics} = \left\{ \frac{J_2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot \text{NOMI}\right)}{J_1\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot \text{NOMI}\right)} \tan^{-1}(\varphi_1 - \varphi_2) \right\}^2 \quad (\text{B.26})$$

$$\text{3rd harmonics} = \left\{ \frac{J_3\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot \text{NOMI}\right)}{J_1\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot \text{NOMI}\right)} \right\}^2 \quad (\text{B.27})$$

$$\text{IM2} = \left\{ \frac{J_1\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot \text{NOMI}\right)}{J_0\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot \text{NOMI}\right)} \tan^{-1}(\varphi_1 - \varphi_2) \right\}^2 \quad (\text{B.28})$$

$$\text{IM3} = \left\{ \frac{J_2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot \text{NOMI}\right)}{J_0\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot \text{NOMI}\right)} \right\}^2 \quad (\text{B.29})$$

$$\text{Triplebeat} = \left\{ \frac{J_1\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot \text{NOMI}\right)}{J_0\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot \text{NOMI}\right)} \right\}^4 \quad (\text{B.30})$$

Therefore, IM2 and IM3 are obtained by using the calculated amount of NOMI from the measurement result of half-wavelength voltage.

Note that, in Equation (B.28), IM2 depends on the bias voltages and NOMI. When the bias voltage deviates from the quadrature-point as illustrated in Figure B.2, IM2 increases remarkably as shown in Figure B.3. On the other hand, IM3 does not depend on the bias voltage, and is determined only by NOMI. The dependency of IM3 on NOMI is shown in Figure B.4.

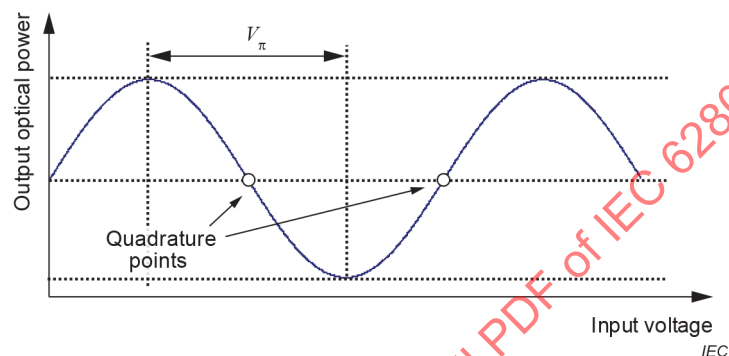


Figure B.2 – Quadrature points of a transfer curve for a Mach-Zehnder optical modulator

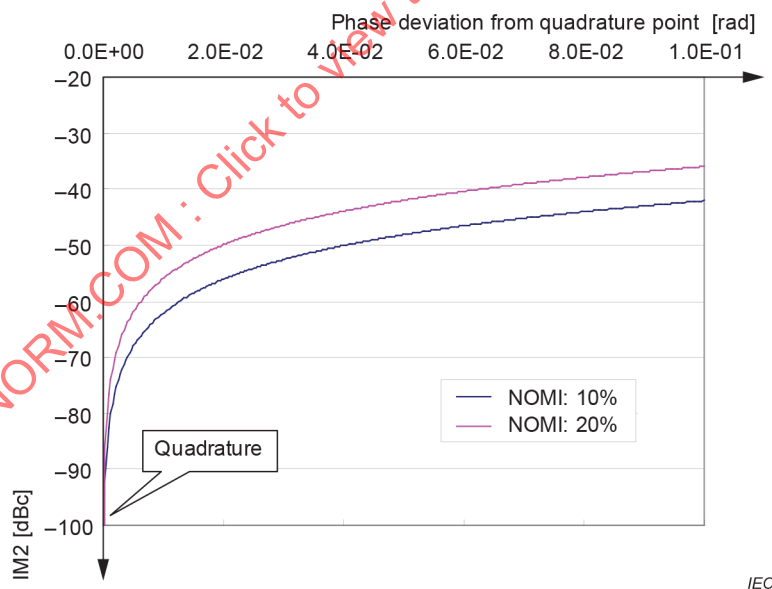


Figure B.3 – Dependency of IM2 on NOMI and bias voltage of a Mach-Zehnder optical modulator

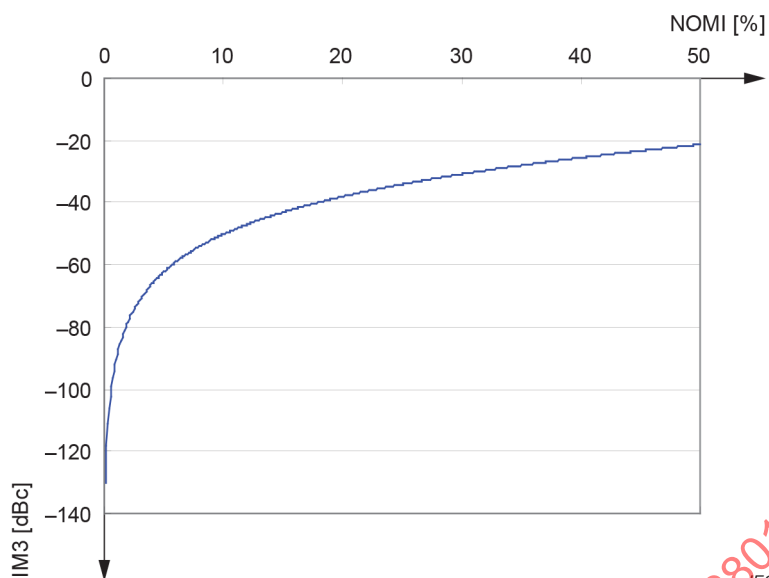


Figure B.4 – Relation between IM3 and OMI of a Mach-Zehnder optical modulator

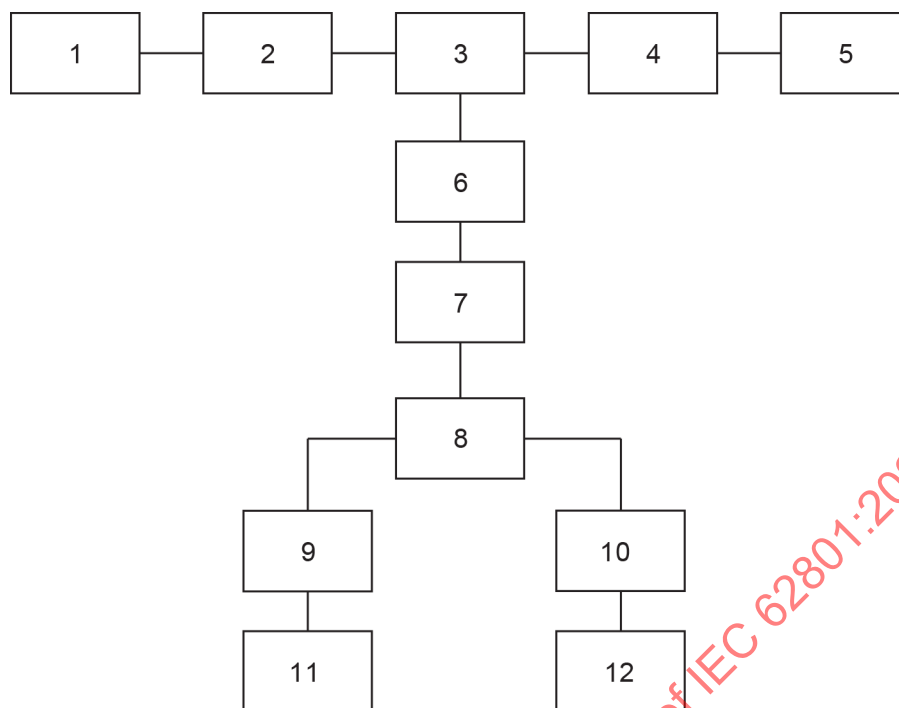
B.3 Conventional measurement methods of intermodulation distortion

B.3.1 General

Conventional measurement methods of the second-order intermodulation distortion (IM2) and the third-order intermodulation distortion (IM3) of optical modulators under specified modulation conditions are described hereafter.

B.3.2 Circuit diagram

See Figure B.5.



IEC

Key

- 1 Laser diode
- 2 Polarization controller
- 3 Device under test
- 4 Photodiode: PD
- 5 Spectrum analyser: ESA
- 6 Attenuator
- 7 Microwave amplifier
- 8 Combiner
- 9 Attenuator
- 10 Attenuator
- 11 Microwave signal source (RF1)
- 12 Microwave signal source (RF2)

Figure B.5 – Conventional intermodulation method**B.3.3 Precautions to be observed**

The modulator shall be effectively coupled to the photodiode with minimal back reflection. The input optical power to the photodiode (PD) should be kept within the linear response range of the PD. The electrical spectrum analyser (ESA) should have a sufficient dynamic range and frequency band corresponding to specified conditions.

B.3.4 Measurement procedures

Couple the optical output of the laser diode from the specified optical port to the device under test, DUT, through the specified optical port to the photodiode (PD). Apply the modulation voltage from the two sine wave sources S1 and S2 to the DUT so as to create two modulation tones of signal frequency f_1 and f_2 . The modulated optical output at the signal frequencies and the modulated optical output at the intermodulation frequencies are recorded on the ESA as shown in Figure B.6. Adjust S1 and S2 so that the modulated optical outputs at the signal frequencies are equal. Vary the signal attenuation with ATT1 and record the modulating power and optical signal power. Confirm the slope of $\text{IMD}_2 (= 2)$ and $\text{IMD}_3 (= 3)$ against the modulating power.

Determine IMD2 and IMD3 by taking the ratio of the amplitude of the larger of the modulated optical intermodulation sidebands to the amplitude of the signals.

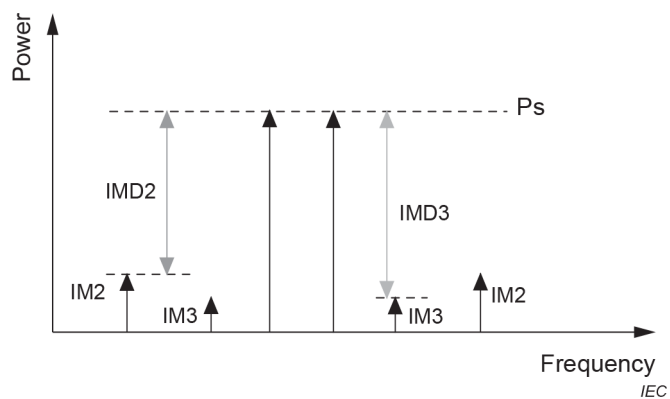


Figure B.6 – IMD2 and IMD3

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62801:2020

Annex C (informative)

Characteristics of Mach-Zehnder optical modulator

C.1 Electrical and optical characteristics of Mach-Zehnder optical modulator

Major examples of electrical and optical characteristics of Mach-Zehnder optical modulators in wireless communication and broadcasting systems are listed in Table C.1.

The specifications for characteristics listed here, particularly "X", are determined by agreements between users and suppliers. The specifications are expected to evolve and change as existing system requirements are refined and new applications are developed.

Table C.1 – Characteristics of optical modulator

Characteristics of optical modulator	Letter symbol	Unit	Min	Max	Reference
Half-wavelength voltage	V_{π}	V	X	X	IEC 62801
Operating wavelength	λ	nm	X	X	
Insertion loss	L_{in}	dB		X	JISC6114-2
Return loss	L_{rt}	dB	X	X	
DC extinction ratio		dB	X		JISC6114-2
AC extinction ratio		dB	X		JISC6114-2
Polarization dependent loss	PDL	dB		X	JISC6114-2
Polarization crosstalk	PCT	dB		X	JISC6114-2
Frequency response		MHz (GHz)		X	
Frequency response flatness		MHz/mV		X	
Wavelength chirp		MHz/mV	X	X	JISC6114-2
Chirp parameter (α)	α		X	X	**
Optical modulation index	OMI	%	X	X	IEC 62000 IEC 62801
Second-order intermodulation distortion	IM2	dBc		X	IEC 62007 IEC 62801
Third-order intermodulation distortion	IM3	dBc		X	IEC 62007 IEC 62801
Composite second-order distortion	CSO	dBc		X	IEC 62007
Composite third-order distortion	CTB	dBc		X	IEC 62007

C.2 Mechanical and environmental characteristics

Major examples of mechanical and environmental characteristics of Mach-Zehnder optical modulators in wireless communication and broadcasting systems are listed in Table C.2.

The specifications for characteristics listed here are defined by agreements between users and suppliers. The specifications are expected to evolve and change as existing system requirements are refined and new applications are developed.

Table C.2 – Mechanical and environmental characteristics

Characteristics of optical modulator	Letter symbol	Unit	Min	Max
Storage temperature	T_{sto}	°C	X	X
Ambient temperature	T_{amb}	°C	X	X
Soldering temperature at maximum soldering time	T_{sld}	°C		X
Bend radius of pigtail	R	mm	X	
Tensile force on fibre along its axes	F	kg		X
Shock				X
Vibration				X

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62801:2020

Annex D (informative)

Notes on measurement

D.1 Factors of measurement uncertainty

D.1.1 Measurement equipment

Power meter:

Total uncertainty will be within 0,2 dB and maximum power limited by +20 dBm for a typical power meter/sensor. To avoid over powering the sensor (and possible damage), a step-attenuator between the DUT and the sensor shall be used. When the step attenuator is used, actual power (in dBm) shall be obtained by subtracting the attenuator values (in dB).

Spectrum analyser:

Generally, the power accuracy of a spectrum analyser is inferior to that of a power meter and is approximately within 2,0 dB. Uncertainty of the Agilent 8563EC spectrum analyser is shown in Table D.1. If a spectrum analyser is used, its accuracy shall be determined before the measurement.

Please refer to the following calculation of measurement uncertainty with medium grade spectrum analyser.

Model: Agilent 8563EC¹

Frequency: 1,0 GHz

Resolution bandwidth (RBW): 3 kHz

ATT: 20 dB

Table D.1 – Spectrum analyser uncertainty

Specification		(Linear-1)	(Linear-1) ²
Frequency response	±1,0 dB	0,26	0,067
Attenuator setting	±0,6 dB	0,15	0,022
Calibration accuracy	±0,3 dB	0,072	0,005
Linearity	±0,1 dB	0,023	0,001
IF gain	±1,0 dB	0,026	0,067
IF BW response	±0,5 dB	0,12	0,015

Total uncertainty		±1,53 dB
$\sqrt{(0,067 + 0,022 + 0,005 + 0,001 + 0,067 + 0,015)} + 1 = 1,421$		
10log (1,421) = 1,53 dB		

¹ The Agilent 8563EC spectrum analyser is an example of a suitable product available commercially. This information is given for the convenience of users of this document and does not constitute an endorsement by IEC of this product.

D.1.2 Measurement range

Measurement accuracy depends on power accuracy by power meter or spectrum analyser.

A typical power meter/sensor has about $\pm 0,2$ dB total uncertainty with -30 dBm to $+20$ dBm power range as the following calculation of measurement uncertainty.

Example 1

Uncertainty using the Agilent E9300A² with EPM power meter (based on the method specified in AN 1449-3), based on the example given on page 34 of Part 3 of AN 1449, literature number 5988-9215EN is shown in Table D.2.

Table D.2 – Uncertainty budget of power meter at only 2 GHz

Test Freq:	2GHz			
Test Power (dBm):	-13		0,050 mW	
DUT SWR	1,22225	$p_{DUT} =$	0,10001125	
Sensor SWR	1,22225	$p_{Sensor} =$	0,10001125	
Sensor/source mismatch ($=p(sensor)*p(DUT)$):	1,00%			
Calibrator source SWR	1,04918	$p_{calibrator\ o/p} =$	0,02400032	
Sensor/calibrator source mismatch ($=p(sensor)*p(calibrator)$):	0,24%			
Noise term	0,7	nW		
Noise multiplier	1	Depend on no. of Averaging		
Zero set	0,5	nW		
Drift	0,15	nW		
	Value(+/-%)	Probability distribution	Divisor	Std uncertainty (k=1)
Identify major source of uncertainties				
1. Source/sensor mismatch at test freq	1,00%	U-shape	1,414	0,707%
2. Sensor/Calibrator source mismatch at test freq	0,24%	U-shape	1,414	0,170%
2. Calibration factor uncertainty at test freq	1,70%	Gaussian	2	0,850%
3. Linearity at test power level	3,00%	Gaussian	2	1,500%
4. Power reference uncertainty	0,60%	Gaussian	2	0,300%
5. Power meter Instrumentation uncertainty	0,50%	Rectangular	1,73205081	0,289%
6. Power meter instrumentation uncertainty (during calibration)	0,50%	Rectangular	1,73205081	0,289%
7. Measurement noise ($=noise\ term*noise\ multiplier/test\ power$)	0,0014%	Rectangular	1,73205081	0,0008%
8. Zero uncertainty ($=zero\ set/test\ power$)	0,0010%	Rectangular	1,73205081	0,0006%
9. Drift ($=drift/test\ power$)	0,0003%	Rectangular	1,73205081	0,0002%
Uc (=Rss of 1 to 9) =	1,94%			
Expanded uncertainty (k=2) =	3,88%			
In log term,	0,165	dB		
	-0,172	dB		

² The Agilent E9300A power meter is an example of a suitable product available commercially. This information is given for the convenience of users of this document and does not constitute an endorsement by IEC of this product.

D.2 RF power source

D.2.1 Limitation from resolution of applied RF power

In this method, the RF voltage $V_{pp, \min}$, where the monitor signal amplitude shows the minimum value, should be found by increasing or decreasing the applied RF power to the modulator. To adjust the applied power to the modulator, the power setting of the signal generator or step attenuator is used, and the minimum setting units are generally 0,1 dB or 0,2 dB/step. In suitable situations the monitor signal amplitude reduces to almost zero and the monitor signal looks like a narrow flat line on the oscilloscope screen. However, in many cases, the amplitude does not reduce down to zero due to the lack of resolution in the applied RF power. Therefore the error value for the estimated RF power, where the monitor signal amplitude shows the minimum value, caused by limitation from the resolution of the RF power setting, is estimated at 0,1 dB to 0,2 dB in generic cases. The absolute errors and the relative errors of half-wavelength voltage, when the resolution of RF power settings are 0,1 dB and 0,2 dB, are shown in Figure D.1 and Figure D.2, respectively.

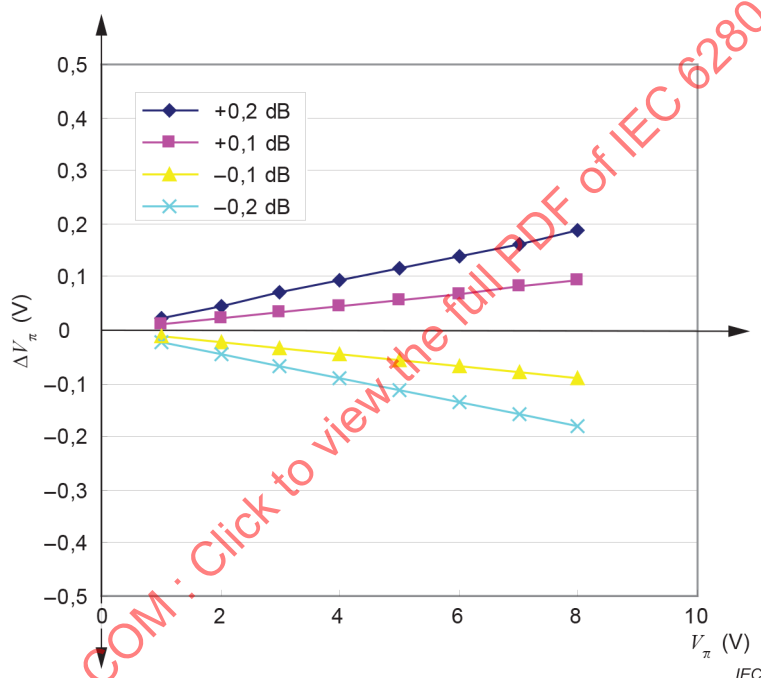


Figure D.1 – Errors of half-wavelength voltage measurements caused by limitations from the resolution of RF power

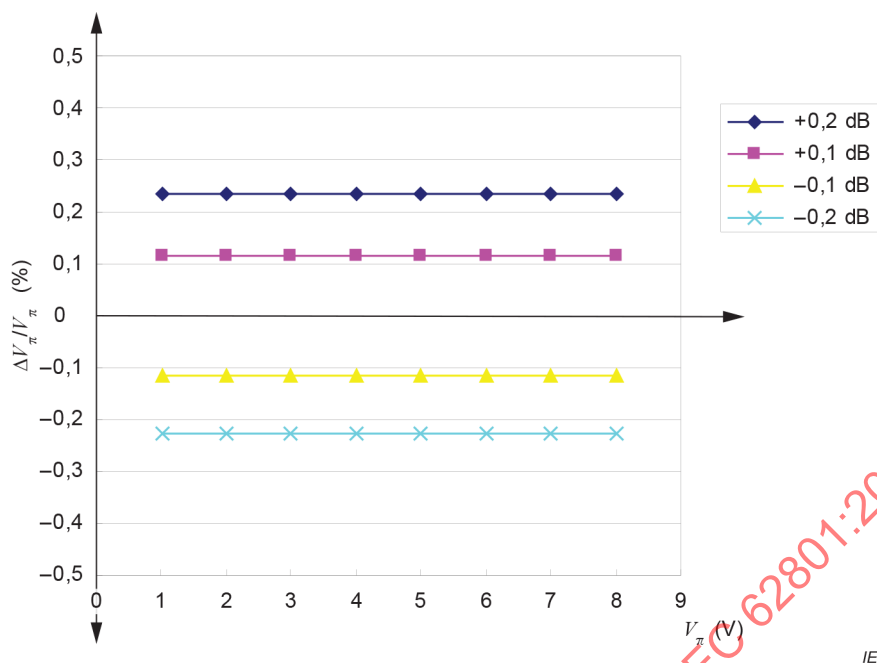


Figure D.2 – Relative errors of half-wavelength voltage measurement caused by limitations from the resolution of RF power

D.2.2 Limitation from the resolution of oscilloscope screen

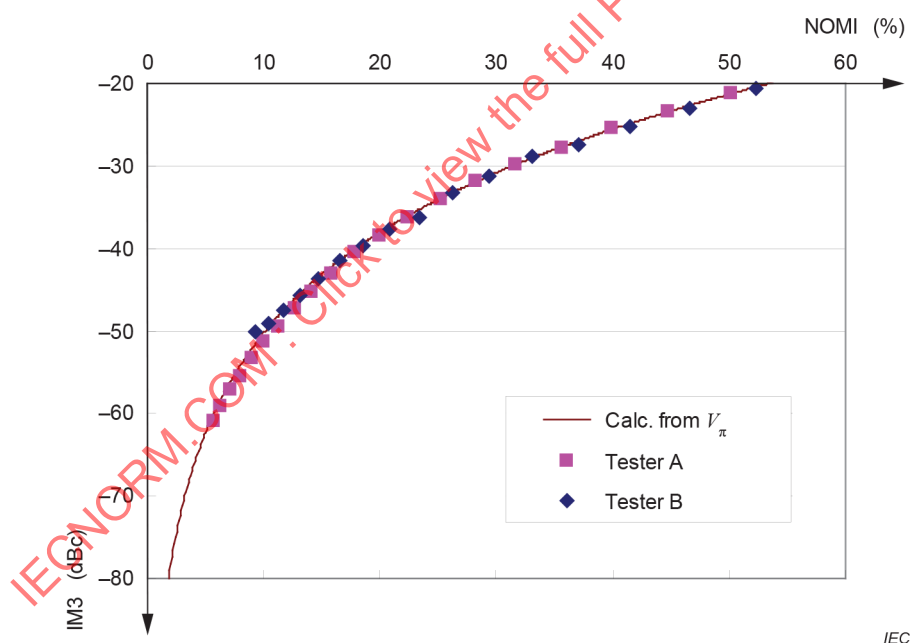
When the applied voltage exceeds $V_{pp \min}$, the amplitude reaches its minimum value and the phase of the monitor signal becomes in anti-phase on the oscilloscope screen. One can easily find the RF power where the monitor signal amplitude shows the minimum value. Therefore readout errors caused by limitations from the resolution of the oscilloscope screen are small.

D.3 Examples of measurement results

Examples of measurement results are shown in Table D.3, Figure D.3, Figure D.4 and Figure D.5.

Table D.3 – Measurement results of half-wave voltages for Mach-Zehnder modulators

Sample # (Type of modulator)	Frequency MHz	V_{π} measured by tester A V	V_{π} measured by tester B V
#1 (optical modulator for broadcasting networks)	650	6,0	4,8
	700	3,9	3,1
	800	1,2	1,2
	801	1,2	1,2
	850	2,2	2,1
	900	2,9	4,2
	950	7,9	5,9
#2 (optical modulator for 10 Gbps digital transmission)	200	-	4,2
	500	4,8	4,3
	800	4,8	4,9
	801	5,0	5,1
	1 000	5,4	4,8
	1 500	-	5,3
	2 000	-	4,8

**Figure D.3 – Relation between NOMI and IM3 for the Mach-Zehnder modulator (sample #1)**

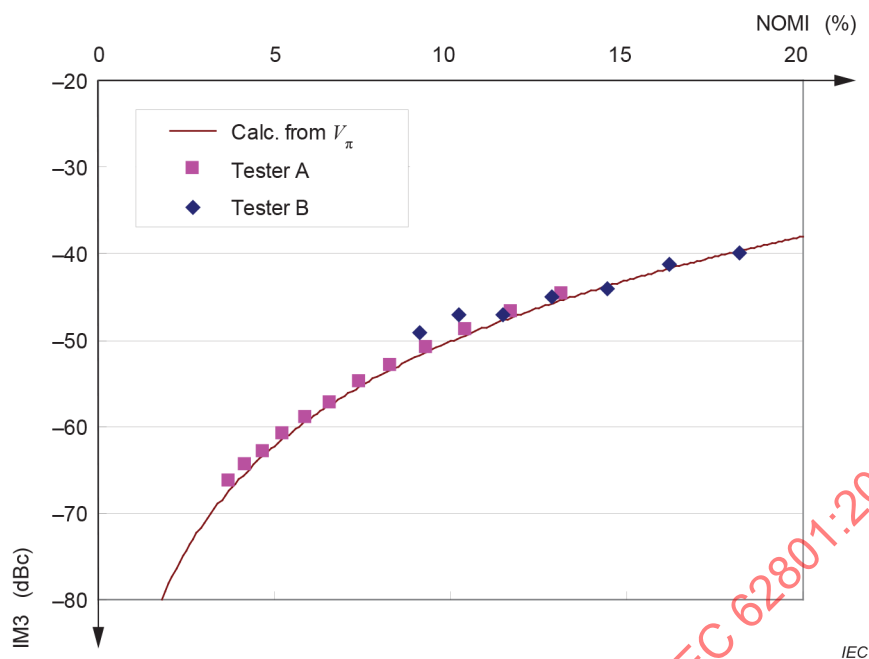


Figure D.4 – Relation between NOMI and IM3 for the Mach-Zehnder modulator (sample #2)

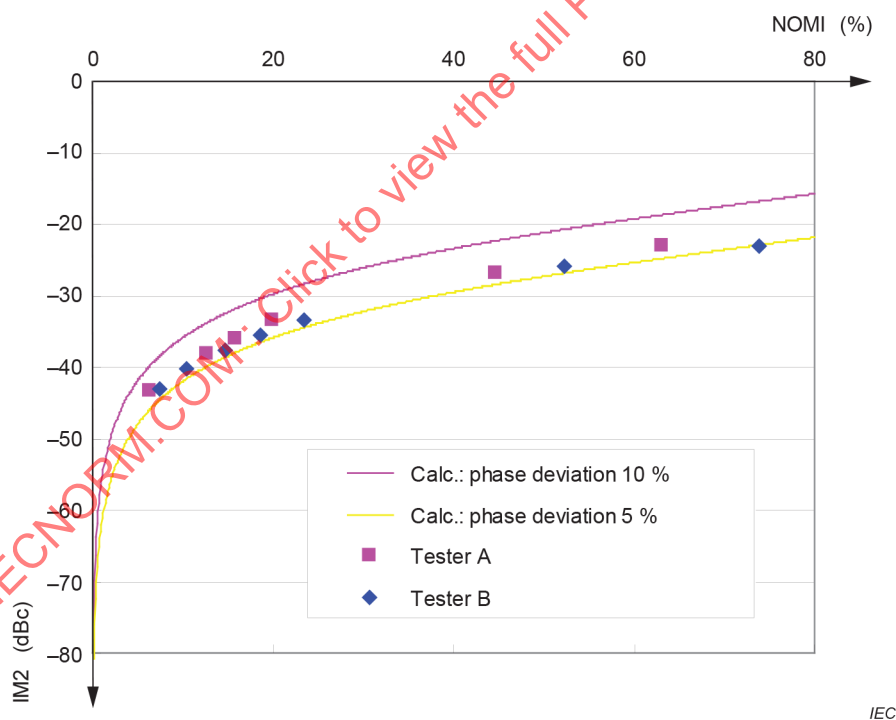


Figure D.5 – Relation between NOMI and IM2 for the Mach-Zehnder modulator (sample #1)

Bibliography

- [1] IEC 62007-1, *Semiconductor optoelectronic devices for fibre optic system applications – Part 1: Specification template for essential ratings and characteristics*
- [2] IEC 62007-2, *Semiconductor optoelectronic devices for fibre optic system applications – Part 2: Measurement methods*
- [3] Keysight Technologies, AN 1449-3:2014 (5988-9215EN), *Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements (Part 3) Power Measurement Uncertainty per International Guides*, August 1, 2014, USA

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62801:2020

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	41
INTRODUCTION.....	43
1 Domaine d'application	44
2 Références normatives	44
3 Termes, définitions, symboles et termes abrégés	44
3.1 Termes et définitions	44
3.2 Symboles et termes abrégés.....	45
4 Modulateur optique de Mach-Zehnder à matériau électro-optique	46
4.1 Modulateur optique de Mach-Zehnder	46
4.1.1 Composants	46
4.1.2 Structure	46
4.2 Exigences relatives au modulateur optique de Mach-Zehnder.....	47
4.2.1 Généralités.....	47
4.2.2 Matériau du substrat.....	47
4.2.3 Conception à guide d'ondes optique	47
5 Échantillonnage pour le contrôle qualité	47
5.1 Échantillonnage	47
5.2 Fréquence d'échantillonnage	47
6 Méthode de mesure de la tension à une demi-longueur d'onde.....	47
6.1 Schéma du circuit	47
6.2 Condition de mesure	48
6.2.1 Température et environnement.....	48
6.2.2 Mise en température du matériel de mesure	48
6.3 Principe de la méthode de mesure	49
6.3.1 Généralités.....	49
6.3.2 Principe de mesure.....	49
6.4 Procédure de mesure.....	51
6.4.1 Généralités.....	51
6.4.2 Schéma de circuit (Type A).....	52
6.4.3 Schéma de circuit (Type B).....	53
Annexe A (normative) Méthode de mesure conventionnelle de l'indice de modulation optique	55
A.1 Vue d'ensemble	55
A.2 Schéma du circuit	55
A.3 Procédure de mesure.....	56
A.3.1 Méthode de l'analyseur de spectre	56
A.3.2 Méthode de l'oscilloscope.....	56
Annexe B (informative) Méthode de calcul des distorsions d'intermodulation utilisant la tension de pilotage et la tension à une demi-longueur d'onde du modulateur optique de Mach-Zehnder.....	57
B.1 Vue d'ensemble	57
B.2 Explication de la méthode de calcul	57
B.3 Méthodes de mesure conventionnelles de la distorsion d'intermodulation	63
B.3.1 Généralités.....	63
B.3.2 Schéma du circuit.....	63
B.3.3 Précautions à respecter.....	64
B.3.4 Procédures de mesure.....	64

Annexe C (informative) Caractéristiques du modulateur optique de Mach-Zehnder	66
C.1 Caractéristiques électriques et optiques du modulateur optique de Mach-Zehnder	66
C.2 Caractéristiques mécaniques et environnementales	67
Annexe D (informative) Notes relatives au mesurage	68
D.1 Facteur d'incertitude de mesure	68
D.1.1 Matériel de mesure	68
D.1.2 Étendue de mesure	69
D.2 Source d'alimentation RF	71
D.2.1 Limitation de résolution de la puissance RF appliquée	71
D.2.2 Limitation de la résolution de l'écran de l'oscilloscope	72
D.3 Exemples de résultats de mesure	72
Bibliographie	75
Figure 1 – Courbe de transfert d'un modulateur optique de Mach-Zehnder	45
Figure 2 – Structure du modulateur optique de type interféromètre de Mach-Zehnder	46
Figure 3 – Schéma fonctionnel du montage de mesure	48
Figure 4 – Fonction de Bessel d'ordre zéro	50
Figure 5 – Changement de forme d'onde sur l'écran de l'oscilloscope	51
Figure 6 – Montage de mesure de la tension de pilotage	52
Figure 7 – Montage de mesure de la tension de pilotage utilisant un diviseur de puissance	53
Figure 8 – Formes d'onde sur l'oscilloscope	54
Figure A.1 – Montage de mesure dans l'IEC 62007-2	55
Figure A.2 – Variation du courant photoélectrique dans le temps	56
Figure B.1 – Modulateur optique de type interféromètre de Mach-Zehnder	57
Figure B.2 – Points de quadrature d'une courbe de transfert d'un modulateur optique de Mach-Zehnder	62
Figure B.3 – Dépendance d'IM2 sur l'indice de modulation optique normalisé et tension de polarisation d'un modulateur optique de Mach-Zehnder	63
Figure B.4 – Relation entre IM3 et l'indice de modulation optique d'un modulateur optique de Mach-Zehnder	63
Figure B.5 – Méthode d'intermodulation conventionnelle	64
Figure B.6 – IMD2 et IMD3	65
Figure D.1 – Erreurs des mesurages de la tension à une demi-longueur d'onde générées par les limitations de la résolution de la puissance RF	71
Figure D.2 – Erreurs relatives du mesurage de la tension à une demi-longueur d'onde générées par les limitations de la résolution de la puissance RF	72
Figure D.3 – Relation entre NOMI et IM3 pour le modulateur de Mach-Zehnder (échantillon n° 1)	73
Figure D.4 – Relation entre NOMI et IM3 pour le modulateur de Mach-Zehnder (échantillon n° 2)	74
Figure D.5 – Relation entre NOMI et IM2 pour le modulateur de Mach-Zehnder (échantillon n° 1)	74
Tableau 1 – Symboles et termes abrégés	46
Tableau C.1 – Caractéristiques du modulateur optique	66

Tableau C.2 – Caractéristiques mécaniques et environnementales	67
Tableau D.1 – Incertitude de l'analyseur de spectre	68
Tableau D.2 – Bilan d'incertitude du wattmètre à 2 GHz uniquement	69
Tableau D.3 – Résultats de mesure des tensions à une demi-longueur d'onde pour les modulateurs de Mach-Zehnder.....	73

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62801:2020

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**MÉTHODE DE MESURE DE LA TENSION À UNE DEMI-LONGUEUR D'ONDE
RELATIVE AUX MODULATEURS OPTIQUES MACH-ZEHNDER DANS LES
SYSTÈMES DE COMMUNICATION ET TRANSMISSION RADIOFRÉQUENCE**

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 62801 a été établie par le comité d'études 103 de l'IEC: Matériels émetteurs pour les radiocommunications.

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

CDV	Rapport de vote
103/120/CDV	103/133/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.

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

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62801:2020

INTRODUCTION

Un éventail d'appareils photoniques micro-ondes peut être utilisé dans les systèmes de communication et de transmission radiofréquence. Un modulateur optique est une interface qui permet de convertir un signal électronique en signal optique. Dans le domaine des systèmes de communication à fibres optiques, les premières éditions de la série IEC 62007 "Dispositifs optoélectroniques à semiconducteurs pour application dans les systèmes à fibres optiques" ont été publiées en 1997. Dans le domaine des systèmes de transmission radiofréquence, les spécifications d'intermodulation et de distorsion composite des modulateurs ont été une question centrale et ont été négociées entre utilisateurs et fournisseurs. Lors de la Conférence internationale sur l'hyperfréquence, il a été proposé de normaliser les appareils des systèmes de transmission radio sur fibres (RoF – *radio-over-fibre*).

Un système RoF est essentiellement composé de deux parties: un convertisseur RF/photonique (E/O) et un convertisseur photonique/RF (O/E). Les ondes radio sont converties en signal optique au niveau du convertisseur E/O, le signal est transféré par la fibre optique, puis les ondes radio sont régénérées au niveau du convertisseur O/E. Les caractéristiques de distorsion non linéaire des convertisseurs E/O et O/E sont importantes pour les performances du système. Les photodiodes à semiconducteurs sont communément utilisées pour les convertisseurs O/E. Plusieurs types de modulateurs optiques sont utilisés pour le convertisseur E/O (les modulateurs de Mach-Zehnder (MZM), les modulateurs à électroabsorption et les diodes laser (LD – *laser diode*) à modulation directe).

Le présent document a été établi pour proposer des méthodes de mesure normalisées pour l'évaluation des matériaux électro-optiques reposant sur des modulateurs optiques de Mach-Zehnder, utilisés dans les systèmes de communication et de transmission radiofréquence. Les caractéristiques de distorsion non linéaire sont également importantes pour les performances du système. La distorsion d'intermodulation du modulateur de Mach-Zehnder est calculée à partir de la tension de pilotage et de la tension à une demi-longueur d'onde. Les détails du calcul de la distorsion d'intermodulation de second ordre (IM2) et de la distorsion d'intermodulation de troisième ordre (IM3) sont présentés à l'Annexe B. Les caractéristiques générales du modulateur optique de Mach-Zehnder sont présentées à l'Annexe C. Des notes relatives au mesurage de la tension à une demi-longueur d'onde sont présentées à l'Annexe D.

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) attire l'attention sur le fait qu'il est déclaré que la conformité avec les dispositions du présent document peut impliquer l'utilisation d'un brevet. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à la portée de ces droits de propriété.

Le détenteur de ces droits de propriété a donné l'assurance à l'IEC qu'il consent à négocier des licences avec des demandeurs du monde entier à des termes et conditions raisonnables et non discriminatoires. À ce propos, la déclaration du détenteur des droits de propriété est enregistrée à l'IEC. Des informations peuvent être obtenues dans la base de données des droits de propriété, disponible à l'adresse suivante: <http://patents.iec.ch>.

L'attention est d'autre part attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété autres que ceux qui ont été enregistrés dans la base de données des droits de propriété. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de l'identification de ces droits de propriété en tout ou partie.

MÉTHODE DE MESURE DE LA TENSION À UNE DEMI-LONGUEUR D'ONDE RELATIVE AUX MODULATEURS OPTIQUES MACH-ZEHNDER DANS LES SYSTÈMES DE COMMUNICATION ET TRANSMISSION RADIOFRÉQUENCE

1 Domaine d'application

Le présent document spécifie une méthode de mesure de la tension d'une demi-longueur d'onde applicable aux modulateurs optiques de Mach-Zehnder dans les systèmes de communication et de transmission radiofréquence. De plus, cette méthode est également efficace pour estimer la distorsion d'intermodulation des modulateurs optiques de Mach-Zehnder. La méthode s'applique à ce qui suit:

- plage de fréquences: 10 MHz à 30 GHz;
- bande de longueur d'onde: 0,8 μm à 2,0 μm ;
- modulateurs optiques de Mach-Zehnder fondés sur matériau électro-optique et leurs modules associés.

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 62007-1, *Dispositifs optoélectroniques à semiconducteurs pour application dans les systèmes à fibres optiques – Partie 1: Modèle de spécification relatif aux valeurs et caractéristiques essentielles*

IEC 62007-2, *Dispositifs optoélectroniques à semiconducteurs pour application dans les systèmes à fibres optiques – Partie 2: Méthodes de mesure*

3 Termes, définitions, symboles et termes abrégés

3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC 62007-1 et l'IEC 62007-2 ainsi que les 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>

3.1.1

tension à une demi-longueur d'onde

V_{π}

tension exigée pour un modulateur optique de Mach-Zehnder à effet Pockels visant à induire un déphasage d'une demi-longueur d'onde entre les ondes lumineuses des deux branches de l'interféromètre de Mach-Zehnder

Note 1 à l'article: Elle correspond à une tension ON/OFF du modulateur optique de Mach-Zehnder, comme représenté à la Figure 1.

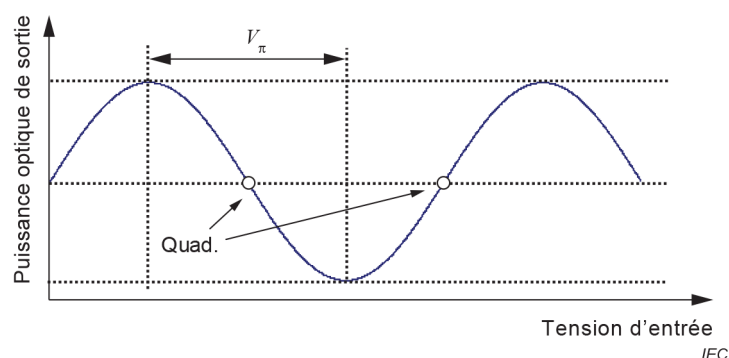


Figure 1 – Courbe de transfert d'un modulateur optique de Mach-Zehnder

3.1.2

indice de modulation optique normalisé NOMI

pour le modulateur optique de Mach-Zehnder, rapport entre la tension de pilotage et la tension à une demi-longueur d'onde du modulateur, défini comme suit:

$$\text{NOMI} = (V_{pp} / V_{\pi}) \times 100 \text{ [\%]} \quad (1)$$

où

V_{pp} est la tension de pilotage (tension crête à crête);

V_{π} est la tension à une demi-longueur d'onde

Note 1 à l'article: NOMI n'indique pas un indice de modulation optique (OMI) réel, défini comme étant le rapport entre la puissance du signal modulé optique et la puissance optique moyenne. Des explications détaillées de l'OMI, y compris la méthode de mesure, sont données à l'Annexe A.

Note 2 à l'article: Le terme abrégé "NOMI" est dérivé du terme anglais développé correspondant "normalized optical modulation index".

3.1.3

rapport d'extinction

R_{ext}

rapport entre deux niveaux de puissance optique du signal optique généré par le modulateur optique, défini comme suit:

$$R_{\text{ext}} = 10 \log(P_1/P_2) \quad (2)$$

où

P_1 est le niveau de puissance optique généré lorsque la puissance de sortie est "activée";

P_2 est le niveau de puissance généré lorsque la puissance de sortie est "désactivée"

3.2 Symboles et termes abrégés

Les symboles et termes abrégés utilisés dans le présent document sont présentés au Tableau 1.

Tableau 1 – Symboles et termes abrégés

R_{ext}	rapport d'extinction
V_{π}	tension à une demi-longueur d'onde
CSO	composite second-order distortion (distorsion composite de second ordre)
CTB	composite triple-beats distortion (distorsion composite à triple battement)
DUT	device under test (appareil en essai)
ASE	analyseur de spectre électrique
IMD	intermodulation distortion (distorsion d'intermodulation)
IM2	distorsion d'intermodulation de second ordre
IM3	distorsion d'intermodulation de troisième ordre
LD	laser diode (diode laser)
MZM	Mach-Zehnder modulator (modulateur de Mach-Zehnder)
NOMI	normalized OMI (indice de modulation optique normalisé)
OMI	optical modulation index (indice de modulation optique)
PD	photodiode
RoF	radio-over-fibre (radio sur fibres)

4 Modulateur optique de Mach-Zehnder à matériau électro-optique

4.1 Modulateur optique de Mach-Zehnder

4.1.1 Composants

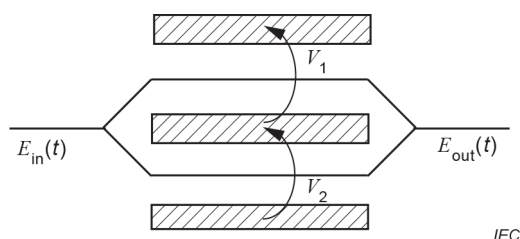
Les modulateurs optiques et leurs modules sont composés des parties de base suivantes:

- modulateur optique de type interféromètre de Mach-Zehnder;
- fibres amorces en entrée et en sortie (s'il y a lieu);
- port de commande de polarisation (s'il y a lieu);
- photodiode pour surveillance de polarisation (s'il y a lieu)
- diode laser en tant que source lumineuse (s'il y a lieu);
- capteur de température (s'il y a lieu);
- élément Peltier (s'il y a lieu).

4.1.2 Structure

Une structure de base des modulateurs optiques de type interféromètre de Mach-Zehnder est représentée à la Figure 2. Les modulateurs sont regroupés par types d'électrodes et par options.

- Électrode: de type localisé, à onde progressive, etc.
- Options: isolateur optique, photodiode, demi-miroir, diode laser, etc.



IEC

Figure 2 – Structure du modulateur optique de type interféromètre de Mach-Zehnder

4.2 Exigences relatives au modulateur optique de Mach-Zehnder

4.2.1 Généralités

Cette méthode repose sur la courbe de transfert théorique de l'interféromètre de Mach-Zehnder à matériau électro-optique, dans laquelle il convient que le déphasage de la lumière de chaque branche de l'interféromètre soit proportionnel à la tension appliquée, la puissance des ondes lumineuses de chaque branche étant pratiquement identique. Les exigences applicables au modulateur dans le cadre de cette méthode de mesure sont données aux 4.2.2 et 4.2.3.

4.2.2 Matériau du substrat

Les principaux matériaux du substrat du modulateur doivent être les suivants: LiNbO_3 , LiTaO_3 , KH_2PO_4 , PZT, PLZT, InP, GaAs, InGaAs, InAlAs, InGaAsP, chromophore de type CLD contenant des polymères, chromophore de type FTC contenant des polymères, etc., à l'origine d'un effet électro-optique (effet Pockels). Il est essentiel que les matériaux semiconducteurs ne présentent aucun effet électro-optique pur. Toutefois, les modulateurs de Mach-Zehnder à semiconducteurs peuvent être déclarés comme étant des modulateurs de Mach-Zehnder à matériaux électro-optiques.

4.2.3 Conception à guide d'ondes optique

Le guide d'ondes optique doit être conçu comme un seul type d'interféromètre de Mach-Zehnder composé de deux jonctions en Y ou de coupleurs directionnels symétriques et de guides d'ondes parallèles. Les modulateurs optiques de Mach-Zehnder à réflexion sont inclus.

5 Échantillonnage pour le contrôle qualité

5.1 Échantillonnage

Un plan d'échantillonnage significatif d'un point de vue statistique doit faire l'objet d'un accord entre l'utilisateur et le fournisseur. Les appareils échantillonnés doivent être sélectionnés de manière aléatoire, être représentatifs de la population de production et satisfaire aux critères d'assurance qualité utilisant les méthodes d'essai proposées.

5.2 Fréquence d'échantillonnage

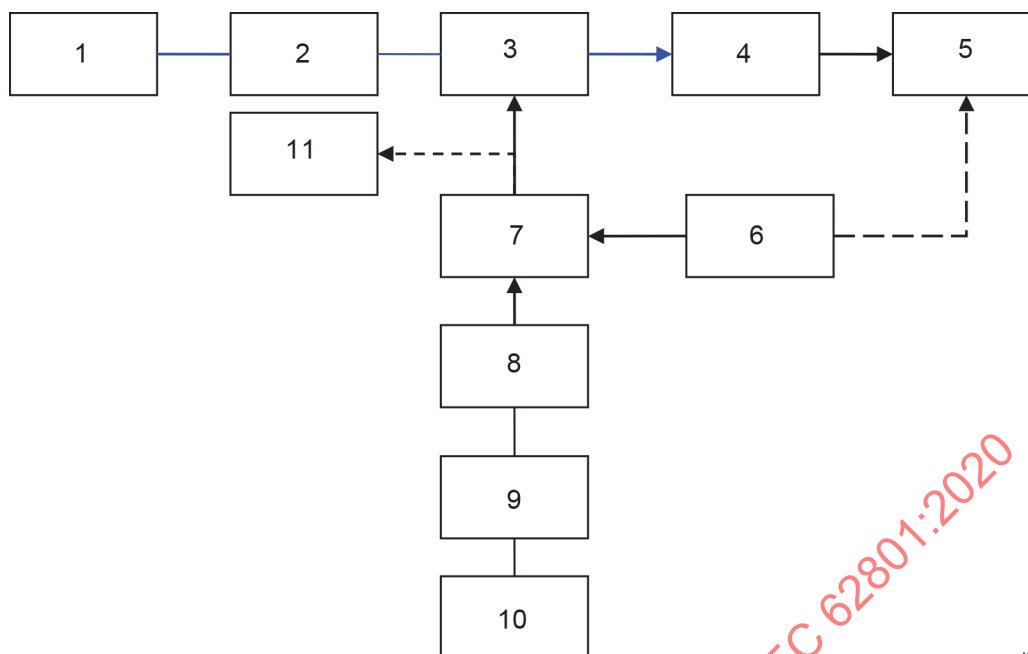
Des méthodes statistiques appropriées doivent être appliquées afin de déterminer l'effectif d'échantillon adapté et les critères d'acceptation pour l'effectif du lot considéré. En l'absence d'autres analyses statistiques détaillées, le plan d'échantillonnage suivant peut être utilisé.

Tension à une demi-longueur d'onde: deux unités au moins par lot de fabrication.

6 Méthode de mesure de la tension à une demi-longueur d'onde

6.1 Schéma du circuit

Voir la Figure 3 pour la description du circuit et les exigences.



IEC

Légende

- 1 Diode laser
- 2 Contrôleur de polarisation
- 3 Appareil en essai
- 4 Photodiode
- 5 Oscilloscope
- 6 Source de signal du moniteur (SG2)
- 7 Té de polarisation
- 8 Atténuateur (à paliers)
- 9 Amplificateur hyperfréquence
- 10 Source du signal hyperfréquence (SG1)
- 11 Wattmètre ou analyseur de spectre (pendant le mesurage)

Figure 3 – Schéma fonctionnel du montage de mesure

6.2 Condition de mesure

6.2.1 Température et environnement

Il convient de réaliser le mesurage dans une pièce dont la température est comprise entre 5 °C et 35 °C. Si les plages de températures de fonctionnement des appareils de mesure sont plus réduites, il convient de suivre les spécifications des appareils de mesure. Il est préférable de contrôler la température de mesure à ± 5 °C afin de limiter au maximum l'influence du décalage de température de l'appareil de mesure. La température du DUT (*device under test* - appareil en essai) peut être modifiée à l'aide d'un contrôleur de température, en fonction des besoins, afin de vérifier dans quelle mesure les paramètres mesurés dépendent de la température, par exemple.

6.2.2 Mise en température du matériel de mesure

La durée de mise en température doit être maintenue à 60 min, ou à celle indiquée dans les spécifications du matériel ou systèmes de mesure. De plus, il convient que la durée de mise en température soit la plus longue parmi tous les matériels de mesure.

6.3 Principe de la méthode de mesure

6.3.1 Généralités

La méthode de mesure de la tension à une demi-longueur d'onde (tension à une demi-longueur d'onde en courant alternatif) d'un modulateur optique de type Mach-Zehnder est présentée ici. Dans cette méthode, les tensions à une demi-longueur d'onde des modulateurs optiques de type Mach-Zehnder peuvent être mesurées précisément sans s'appuyer sur la tension de polarisation d'un modulateur optique. Lorsque le signal RF en entrée du modulateur est défini à un niveau spécifique permettant aux fonctions de Bessel d'ordre zéro d'être nulles, la puissance de sortie optique moyenne du modulateur devient constante quelle que soit la tension de polarisation. En mesurant la puissance ou la tension RF en entrée dans ces conditions, la tension à une demi-longueur d'onde, V_π , est déterminée. Ce mesurage peut être réalisé sur une large plage de fréquences, même si une source de signal haute tension est nécessaire (environ 1,5 fois V_π).

6.3.2 Principe de mesure

La puissance de sortie optique des modulateurs de Mach-Zehnder est donnée par,

$$I = \frac{I_0}{2} [1 + \cos(\Phi_1 + \Phi_2)] \quad (3)$$

$$\Phi_1 = \frac{\pi V_{pp}}{2V_\pi} \sin(2\pi ft) \quad (4)$$

$$\Phi_2 = \text{const.} \quad (5)$$

où Φ_1 et Φ_2 sont, respectivement, le changement de phase provoqué par le signal RF haute fréquence et celui dû à la tension de polarisation. V_π est la tension à une demi-longueur d'onde à la fréquence du signal RF f , V_{pp} est l'amplitude de tension crête à crête de l'onde haute fréquence, et I_0 est la puissance de sortie optique maximale. La puissance moyenne dans le temps de I , I' , est calculée par

$$\begin{aligned} I' &= f \int_0^{1/f} \frac{I_0}{2} [1 + \cos(\Phi_1 + \Phi_2)] dt \\ &= f \int_0^{1/f} \frac{I_0}{2} [1 + \cos \Phi_1 \cos \Phi_2 - \sin \Phi_1 \sin \Phi_2] dt \end{aligned} \quad (6)$$

Après le calcul de l'Équation (6), est obtenu:

$$\begin{aligned} I' &= f \int_0^{1/f} \frac{I_0}{2} \left[1 + \cos \left\{ \frac{\pi V_{pp}}{2V_\pi} \sin(2\pi ft) \right\} \cos \Phi_2 - \sin \left\{ \frac{\pi V_{pp}}{2V_\pi} \sin(2\pi ft) \right\} \sin \Phi_2 \right] dt \\ &= f \int_0^{1/f} \frac{I_0}{2} \left[1 + \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n \cos(2n \cdot 2\pi ft) J_{2n} \left\{ \frac{\pi V_{pp}}{2V_\pi} \right\} \cos \Phi_2 - \sum_{n=0}^{\infty} 2 \sin((2n+1)2\pi ft) J_{2n+1} \left\{ \frac{\pi V_{pp}}{2V_\pi} \right\} \sin \Phi_2 \right] dt \quad (7) \\ &= \frac{I_0}{2} \left[1 + J_0 \left(\frac{\pi V_{pp}}{2V_\pi} \right) \cos \Phi_2 \right] \end{aligned}$$

où

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1 \dots n = 0 \\ 2 \dots n \neq 0 \end{cases}$$

Lorsque le signal RF en entrée est réglé de manière à pouvoir satisfaire à la relation $\pi V_{pp \min} / (2V_\pi) = 2,405$, le terme de la fonction de Bessel d'ordre zéro de l'Équation (7) devient nul, et la moyenne temporelle de la puissance de sortie optique devient constante. Comme le représente la Figure 4, il existe un certain nombre d'amplitudes de tension auxquelles la composante en courant alternatif de I' devient nulle. $V_{pp \min}$ indique la plus basse d'entre elles.

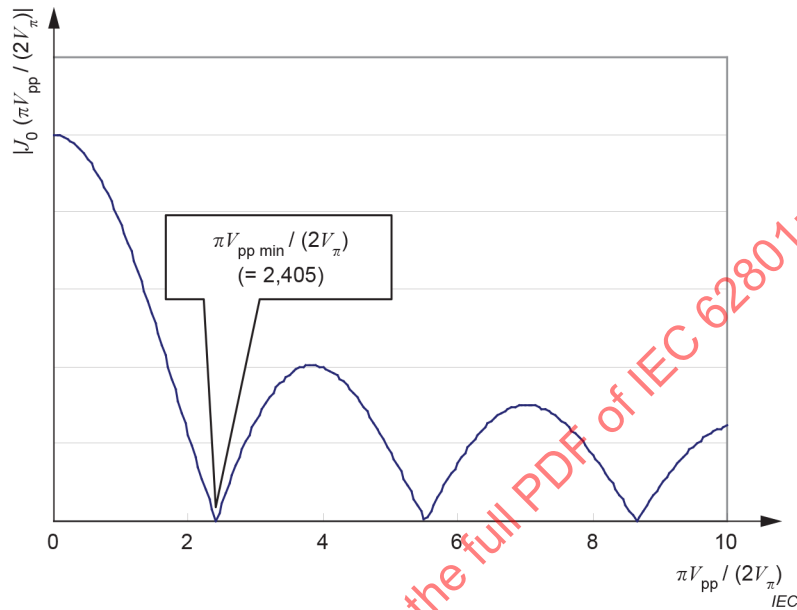


Figure 4 – Fonction de Bessel d'ordre zéro

Le schéma fonctionnel du montage de mesure est représenté à la Figure 3. Pour déterminer aisément l'état dans lequel la sortie optique est constante, un signal basse fréquence pour le moniteur (SG2) est superposé au signal RF. En ajustant l'amplitude de tension RF du signal haute fréquence (SG1), la condition peut être observée dans laquelle l'amplitude du signal du moniteur (SG2) présente la valeur minimale. À cette condition, la forme d'onde du signal du moniteur se présente sous la forme d'une ligne apériodique sur l'écran de l'oscilloscope. V_π à la fréquence de SG1 peut être calculée à partir du résultat mesuré de $V_{pp \min}$ à l'aide de la relation suivante.

$$V_\pi = \frac{\pi V_{pp \min}}{2 \times 2,405} = \frac{\pi \cdot 20(10^{(P_{S1}/10-3)})^{1/2}}{2 \times 2,405} \quad (8)$$

Selon cette méthode, la tension à une demi-longueur d'onde V_π d'un modulateur optique de type Mach-Zehnder peut être aisément déterminée en mesurant la valeur minimale $V_{pp \min}$ de l'amplitude de tension du signal en courant alternatif haute fréquence lorsque le changement d'intensité d'une onde lumineuse de sortie associée au signal en courant alternatif basse fréquence de surveillance est proche de zéro, comme représenté à la Figure 5. En outre, si la fréquence d'essai est élevée, étant donné qu'il n'est pas nécessaire d'observer directement la forme d'onde haute fréquence, il est possible de procéder à un mesurage exact. En même temps, il n'est pas utile d'ajuster le point de polarisation (cette méthode ne reposant pas sur lui), la variation de ce point de polarisation du modulateur optique n'ayant aucun effet.

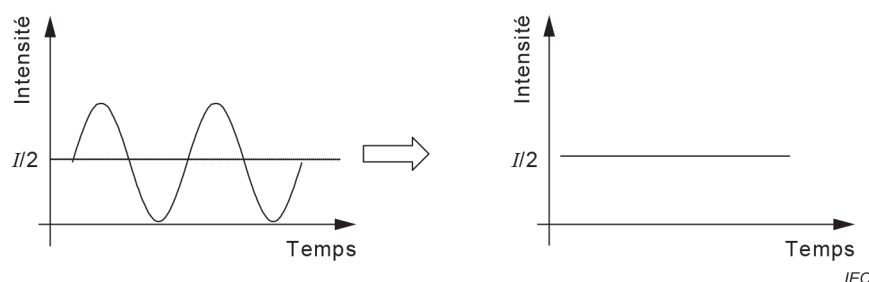


Figure 5 – Changement de forme d'onde sur l'écran de l'oscilloscope

6.4 Procédure de mesure

6.4.1 Généralités

ÉTAPE 1) Le montage de mesure est préparé conformément à la Figure 6.

ÉTAPE 2) Pour mesurer la valeur minimale $V_{pp \min}$, les signaux de sortie de SG1 et SG2 (abrégés en S1 et S2, respectivement) sont définis comme suit.

S1 (conditions initiales);

Fréquence: fréquence de mesure de la tension de pilotage (800 MHz, 801 MHz, etc.);

Puissance de sortie: ≤ 0 dBm ($0,6 V_{pp}$) au Point a;

S2 (conditions initiales);

Fréquence: 1 ton à sélectionner dans la plage comprise entre 1 kHz et 2 MHz;

Puissance de sortie: $\leq 1 V_{pp}$ to $5 V_{pp}$ au Point a.

ÉTAPE 3) La tension en courant continu appliquée au modulateur LN peut être contrôlée manuellement et automatiquement (il n'est pas nécessaire d'ajuster la tension en courant continu).

ÉTAPE 4) La forme d'onde de Ch2 détectée par la PD s'affiche dans l'oscilloscope. La forme d'onde chevauchante de Ch1 s'affiche également simultanément.

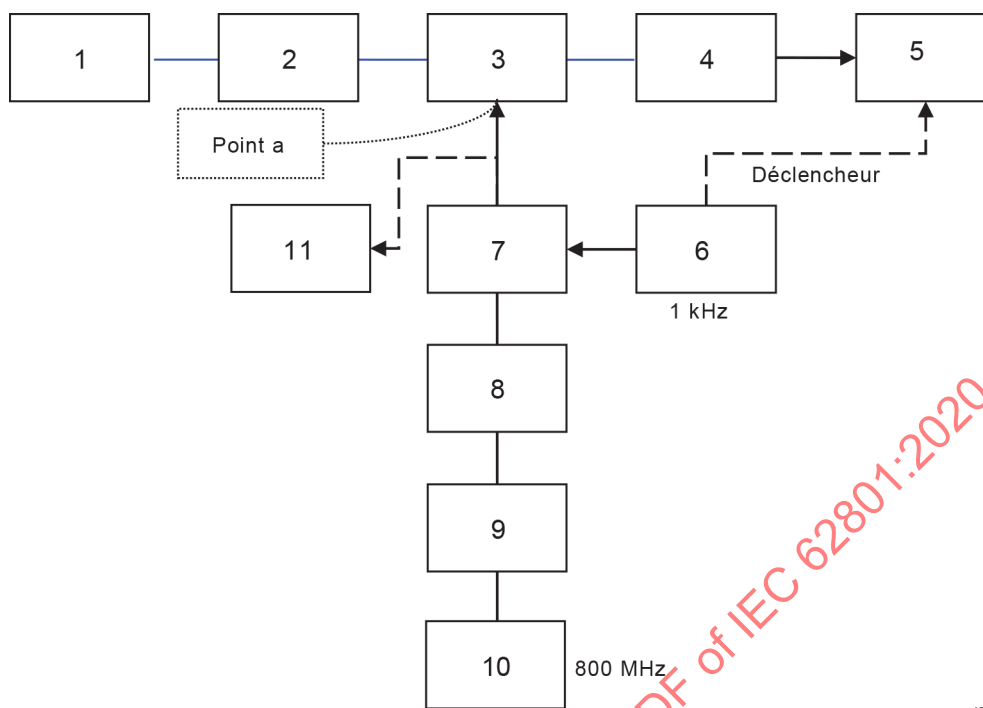
ÉTAPE 5) Lorsque la puissance de S1 augmente de manière continue, l'amplitude de Ch2 modulée périodiquement par l'élément S2 devient presque nulle (voir Figure 8). La première puissance S1 (au Point a) à rendre l'amplitude presque nulle est mesurée par le wattmètre, et V_{π} est calculée.

La tension à une demi-longueur d'onde peut être obtenue à partir de la puissance S1 mesurée (au Point a), P_{S1} , à l'aide de la formule suivante.

$$V_{\pi} = \frac{\pi V_{pp \min}}{2 \times 2,405} = \frac{\pi \cdot 20(10^{(P_{S1}/10-3)})^{1/2}}{2 \times 2,405}$$

NOTE Le schéma de circuit modifié est représenté à la Figure 7. Dans ce cas, un diviseur de puissance est utilisé à la place d'un atténuateur, et la reconnexion au modulateur et au wattmètre n'est pas exigée pour mesurer la puissance RF au Point a. La puissance du Point a est étalonnée selon le rapport de puissance entre les Points a et b.

6.4.2 Schéma de circuit (Type A)



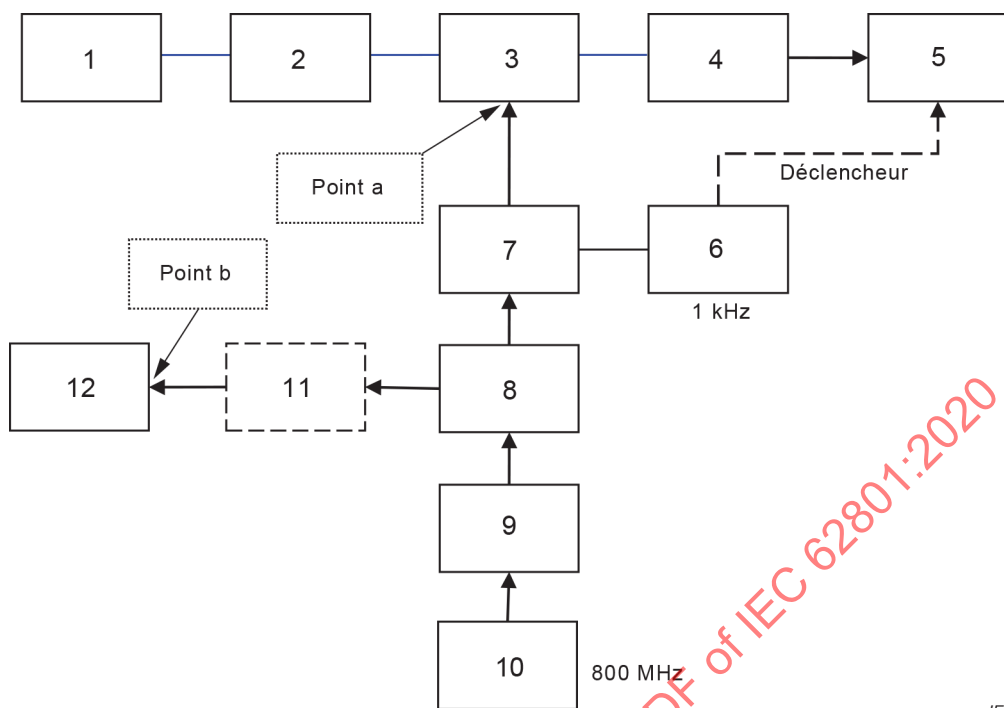
IEC

Légende

- 1 Diode laser
- 2 Contrôleur de polarisation
- 3 Appareil en essai
- 4 Photodiode
- 5 Oscilloscope
- 6 Source du signal (LF)
- 7 Té de polarisation
- 8 Atténuateur (à paliers)
- 9 Amplificateur hyperfréquence
- 10 Source du signal hyperfréquence
- 11 Wattmètre (pendant le mesurage)

Figure 6 – Montage de mesure de la tension de pilotage

6.4.3 Schéma de circuit (Type B)

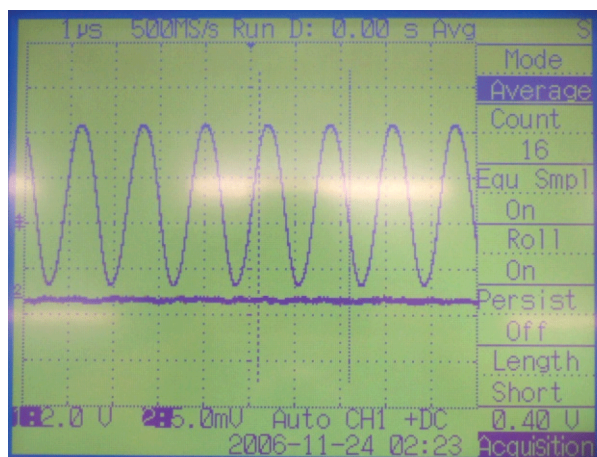


IEC

Légende

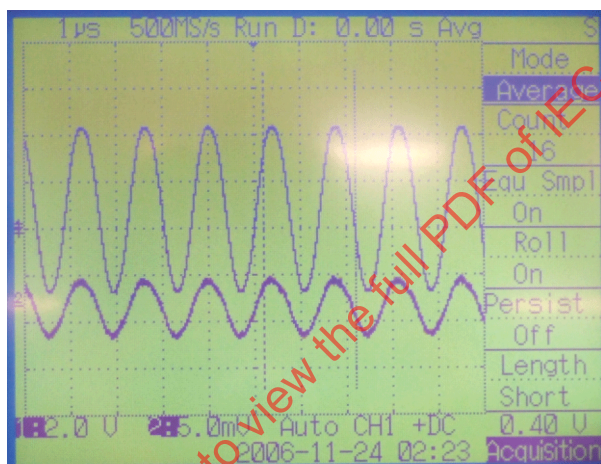
- 1 Diode laser
- 2 Contrôleur de polarisation
- 3 Appareil en essai
- 4 Photodiode
- 5 Oscilloscope
- 6 Source du signal (LF)
- 7 Té de polarisation
- 8 Diviseur de puissance
- 9 Amplificateur hyperfréquence
- 10 Source du signal hyperfréquence
- 11 Atténuateur (si nécessaire)
- 12 Wattmètre

Figure 7 – Montage de mesure de la tension de pilotage utilisant un diviseur de puissance



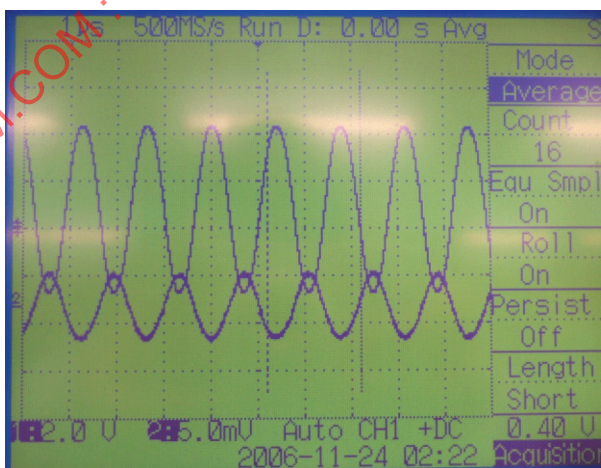
IEC

a) Amplitude du signal optique presque nulle



IEC

b) Signal optique modulé en phase avec l'élément S2



IEC

c) Signal optique modulé en phase opposée avec l'élément S2

Figure 8 – Formes d'onde sur l'oscilloscope

Annexe A (normative)

Méthode de mesure conventionnelle de l'indice de modulation optique

A.1 Vue d'ensemble

L'Annexe A décrit les méthodes de mesure génériques de l'indice de modulation optique (OMI) d'un modulateur optique analogique dans des conditions de modulation spécifiées. Les informations détaillées font l'objet de l'IEC 62007-2.

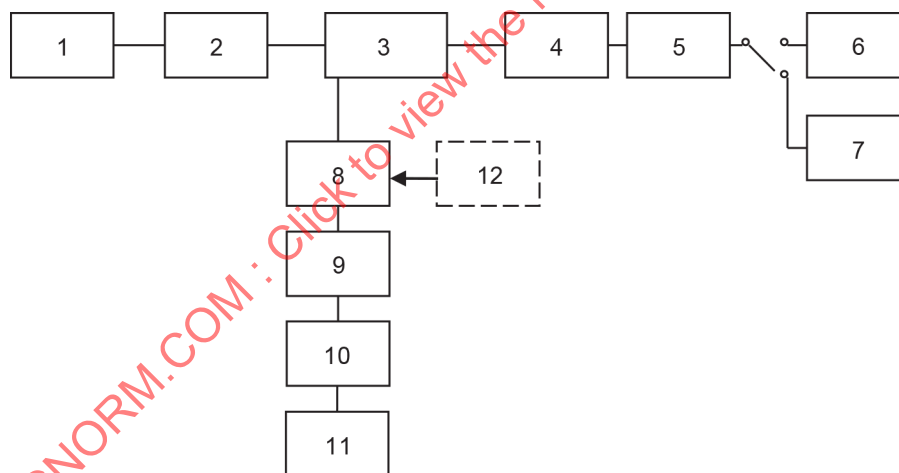
Pour le modulateur optique de Mach-Zehnder, l'OMI normalisé (NOMI) est défini dans la formule suivante:

$$\text{NOMI} = (V_{pp} / V_{\pi}) \times 100 [\%]$$

et peut être aisément obtenu par calcul à partir du résultat de mesure de la tension à une demi-longueur d'onde.

A.2 Schéma du circuit

Voir la Figure A.1 pour la description du circuit et les exigences.



IEC

Légende

- 1 Diode laser
- 2 Contrôleur de polarisation
- 3 Appareil en essai
- 4 Photodiode
- 5 Bloc en courant continu
- 6 Oscilloscope
- 7 Wattmètre
- 8 Té de polarisation
- 9 Atténuateur (à paliers)
- 10 Amplificateur hyperfréquence
- 11 Source du signal hyperfréquence (RF1)
- (12 Polarisation de source en courant continu)

Figure A.1 – Montage de mesure dans l'IEC 62007-2

A.3 Procédure de mesure

A.3.1 Méthode de l'analyseur de spectre

L'appareil en essai est modulé avec une seule fréquence RF par source du signal, S_k . La sortie optique est couplée à l'entrée du détecteur. Le détecteur est correctement polarisé avec la source en courant continu. Un ampèremètre est utilisé pour mesurer le courant photoélectrique moyen I_{ph} . L'impédance du détecteur est adaptée au matériel de mesure. L'amplitude du courant du signal peut être déterminée à partir de la puissance P à l'une des fréquences de modulation détectée par l'analyseur de spectre ou le wattmètre RF.

L'indice de modulation optique peut être calculé par:

$$OMI = (2 P_w / R)^{1/2} / I_{ph} \quad (A.1)$$

où

P_w est la puissance électrique détectée, en watts;

R est la résistance de charge, en ohm (adaptée à l'impédance de l'analyseur de spectre ou du wattmètre);

I_{ph} est le courant photoélectrique moyen, en ampères.

A.3.2 Méthode de l'oscilloscope

Un modulateur optique est modulé avec une seule fréquence RF par source du signal, S_k . L'impédance de la photodiode (PD) est adaptée, et est à présent couplée en courant continu à un oscilloscope par l'intermédiaire de R . Comme le représente la Figure A.2, la courbe de transfert du modulateur peut être observée. L'indice de modulation optique peut être calculé par la Formule (A.2).

$$OMI = (i_{\max} - i_{\min}) / (i_{\max} + i_{\min}) = i / i_{av} \quad (A.2)$$

où

$i_{\max}$ est le courant du signal maximal (par porteuse);

$i_{\min}$ est le courant du signal minimal;

i est l'amplitude du courant du signal;

i_{av} est le courant du signal moyen.

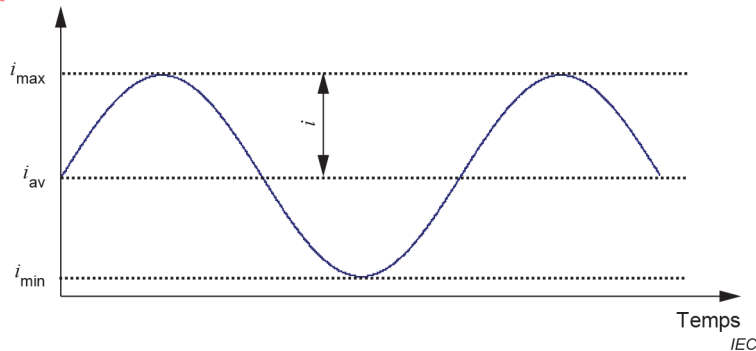


Figure A.2 – Variation du courant photoélectrique dans le temps

Dans cette méthode, un oscilloscope correspondant à la fréquence du signal est exigé. Il convient que la photodiode (PD) corresponde à la fréquence du signal. Il convient de maintenir la puissance optique en entrée de la photodiode dans la plage de réponse linéaire de la photodiode.

Annexe B (informative)

Méthode de calcul des distorsions d'intermodulation utilisant la tension de pilotage et la tension à une demi-longueur d'onde du modulateur optique de Mach-Zehnder

B.1 Vue d'ensemble

L'Annexe B décrit la méthode de calcul de la quantité d'intermodulation à partir de l'indice de modulation optique défini comme étant le rapport de la tension de pilotage sur la tension à une demi-longueur d'onde du modulateur optique de Mach-Zehnder. Les méthodes de mesure conventionnelles de la distorsion d'intermodulation de second ordre (IM2) et de troisième ordre (IM3) des modulateurs optiques dans les conditions de modulation spécifiées sont présentées en référence.

B.2 Explication de la méthode de calcul

Si la valeur de l'indice de modulation optique (OMI) est calculée à partir des résultats de mesure de la tension à une demi-longueur d'onde, la distorsion d'intermodulation (IMD) du modulateur optique de Mach-Zehnder peut être obtenue. Les détails des calculs de la distorsion d'intermodulation de second ordre (IM2) et de troisième ordre (IM3) sont présentés ci-dessous.

Les signaux à plusieurs porteuses sont entrés dans un modulateur optique de Mach-Zehnder (voir Figure B.1).

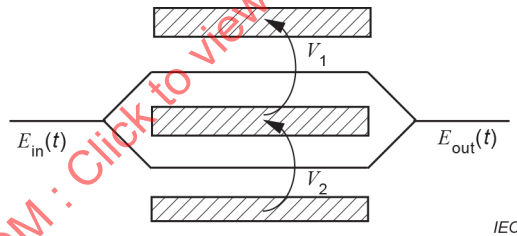


Figure B.1 – Modulateur optique de type interféromètre de Mach-Zehnder

Les tensions de signal, V_1 et V_2 , sont exprimées comme suit;

$$V_1 = V_{DC1} + \sum_{k=1}^N v_{RF} \sin(\omega_k t + \phi_{RF1}) \quad (B.1)$$

$$V_2 = V_{DC2} + \sum_{k=1}^N v_{RF} \sin(\omega_k t + \phi_{RF2}) \quad (B.2)$$

$$(k = 1, 2, \dots, N)$$

où V_{DC1} , V_{DC2} sont les tensions en courant continu en entrée du modulateur optique, v_{RF} est une amplitude du signal RF en entrée, ω_k est une fréquence angulaire du $k^{\text{ème}}$ canal dans le signal FDM, et ϕ_{RF1} , ϕ_{RF2} sont la phase initiale du signal RF en entrée. ϕ_{RF1} et ϕ_{RF2} présentent une relation comme suit:

$$\varphi_{RF2} = \varphi_{RF1} + \pi \quad (B.3)$$

La porteuse optique en entrée du modulateur optique est réputée être

$$E_{in}(t) = \sqrt{2P_{in}} e^{j(\omega_0 t)} \quad (B.4)$$

où P_{in} est la puissance optique en entrée du modulateur optique et ω_0 est la fréquence angulaire du signal d'entrée optique. Le signal de sortie optique est donc exprimé comme suit

$$E_{out}(t) = \sqrt{P_{in} L_{opt}} \left[e^{j\{\omega_0 t + \phi_1 + v(t)\}} + e^{j\{\omega_0 t + \phi_2 + v'(t)\}} \right] \quad (B.5)$$

où L_{opt} est la perte optique du modulateur optique, et

$$\phi_1 = \frac{\pi}{2} \frac{V_{DC1}}{V_{\pi DC}} \quad (B.6)$$

$$\phi_2 = \frac{\pi}{2} \frac{V_{DC2}}{V_{\pi DC}} \quad (B.7)$$

$$v(t) = m \sum_{k=1}^N \sin(\omega_k t + \phi_{RF1}) \quad (B.8)$$

$$v'(t) = m \sum_{k=1}^N \sin(\omega_k t + \phi_{RF2} + \pi) = -m \sum_{k=1}^N \sin(\omega_k t + \phi_{RF2}) \quad (B.9)$$

où m est la phase optique induite due au signal d'entrée RF. Quand $E_{out}(t)$ est détecté par la photodiode avec sa sensibilité, r , le courant de sortie de la photodiode est donné par

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{r}{2} |E_{out}(t)|^2 \\ &= \frac{1}{2} r P_{in} L_{opt} \left[2 + e^{j\{\phi_1 - \phi_2 + 2v(t)\}} + e^{j\{\phi_1 - \phi_2 + 2v'(t)\}} \right] \\ &= r P_{in} L_{opt} \left[1 + \cos(2v(t) + \Delta\phi) \right] \\ &= r P_{in} L_{opt} \left[1 + \operatorname{Re} \left[e^{j \left\{ 2m \sum_{k=1}^N \sin(\omega_k t + \phi_{RF1}) + \Delta\phi \right\}} \right] \right] \\ &= r P_{in} L_{opt} \left[1 + \operatorname{Re} \left[e^{j \left\{ 2m \sum_{k=1}^N \sin\theta_k(t) \right\}} e^{j(\Delta\phi)} \right] \right] \end{aligned} \quad (B.10)$$

où

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (\text{B.11})$$

$$\theta_k(t) = \omega_k t + \varphi_{\text{RF1}} \quad (\text{B.12})$$

et

$$\begin{aligned} e^{j\left\{2m \sum_{k=1}^N \sin\theta_k(t)\right\}} &= \prod_{k=1}^N e^{j\{2m \sin\theta_k(t)\}} \\ &= \prod_{k=1}^N \left[\sum_{n_k=-\infty}^{\infty} J_{n_k}(2m) e^{jn_k \theta_k(t)} \right] \\ &= \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \sum_{n_2=-\infty}^{\infty} \cdots \sum_{n_N=-\infty}^{\infty} J_{n_1}(2m) J_{n_2}(2m) \cdots J_{n_N}(2m) e^{j \sum_{k=1}^N n_k \theta_k(t)} \end{aligned} \quad (\text{B.13})$$

Par conséquent, l'Equation (B.10) est

$$\begin{aligned} i(t) &= rP_{\text{in}} L_{\text{opt}} \left[1 + \left[\text{Re} \left[e^{j\Delta\varphi} \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \sum_{n_2=-\infty}^{\infty} \cdots \sum_{n_N=-\infty}^{\infty} J_{n_1}(2m) J_{n_2}(2m) \cdots J_{n_N}(2m) e^{j \sum_{k=1}^N n_k \theta_k(t)} \right] \right] \right] \\ &= rP_{\text{in}} L_{\text{opt}} \left[1 + \text{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \sum_{n_2=-\infty}^{\infty} \cdots \sum_{n_N=-\infty}^{\infty} J_{n_1}(2m) J_{n_2}(2m) \cdots J_{n_N}(2m) e^{j \sum_{k=1}^N n_k (\omega_k t + \varphi_{\text{RF1}})} \right] \right] \end{aligned} \quad (\text{B.14})$$

La composante fondamentale du $h^{\text{ème}}$ canal est:

$$\begin{aligned} n_k &= \begin{cases} \pm 1 & \text{pour } n_h \\ \text{sinon } 0 \end{cases} \\ i_{1\text{st}}(t) &= rP_{\text{in}} L_{\text{opt}} \text{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-1} \left\{ J_1(2m) e^{j(\omega_h t + \varphi_{\text{RF1}})} + J_{-1}(2m) e^{-j(\omega_h t + \varphi_{\text{RF1}})} \right\} \right] \\ &= rP_{\text{in}} L_{\text{opt}} \text{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-1} J_1(2m) \left\{ e^{j(\omega_h t + \varphi_{\text{RF1}})} - e^{-j(\omega_h t + \varphi_{\text{RF1}})} \right\} \right] \\ &= -2rP_{\text{in}} L_{\text{opt}} \{J_0(2m)\}^{N-1} J_1(2m) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \sin(\omega_h t + \varphi_{\text{RF1}}) \end{aligned} \quad (\text{B.15})$$

La deuxième composante d'harmonique du $h^{\text{ème}}$ canal est:

$$n_k = \begin{cases} \pm 2 & \text{pour } n_h \\ \text{sinon } 0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 i_{2HD}(t) &= rP_{in}L_{opt} \operatorname{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-1} \left\{ J_2(2m)e^{j(2\omega_h t + 2\varphi_{RF1})} + J_{-2}(2m)e^{-j(2\omega_h t + 2\varphi_{RF1})} \right\} \right] \\
 &= rP_{in}L_{opt} \operatorname{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-1} J_2(2m) \left\{ e^{j(2\omega_h t + 2\varphi_{RF1})} + e^{-j(2\omega_h t + 2\varphi_{RF1})} \right\} \right] \\
 &= 2rP_{in}L_{opt} \{J_0(2m)\}^{N-1} J_2(2m) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \cos(2\omega_h t + 2\varphi_{RF1})
 \end{aligned} \tag{B.16}$$

La troisième composante d'harmonique du $h^{\text{ème}}$ canal est:

$$n_k = \begin{cases} \pm 3 & \text{pour } n_h \\ \text{sinon } 0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 i_{3HD}(t) &= rP_{in}L_{opt} \operatorname{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-1} \left\{ J_3(2m)e^{j(3\omega_h t + 3\varphi_{RF1})} + J_{-3}(2m)e^{-j(3\omega_h t + 3\varphi_{RF1})} \right\} \right] \\
 &= rP_{in}L_{opt} \operatorname{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-1} J_3(2m) \left\{ e^{j(3\omega_h t + 3\varphi_{RF1})} - e^{-j(3\omega_h t + 3\varphi_{RF1})} \right\} \right] \\
 &= -2rP_{in}L_{opt} \{J_0(2m)\}^{N-1} J_3(2m) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \sin(3\omega_h t + 3\varphi_{RF1})
 \end{aligned} \tag{B.17}$$

Les composantes de distorsion d'intermodulation du second ordre générées par les signaux 2 tons sont:

$$n_k = \begin{cases} \pm 1 & \text{pour } n_h \\ \mp 1 & \text{pour } n_i \\ \text{sinon } 0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 i_{IM2}(t) &= -rP_{in}L_{opt} \operatorname{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-2} \{J_1(2m)\}^2 \left\{ e^{j(\omega_h - \omega_i)t} + e^{-j(\omega_h - \omega_i)t} \right\} \right] \\
 &= -2rP_{in}L_{opt} \{J_0(2m)\}^{N-2} \{J_1(2m)\}^2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \cos\{(\omega_h - \omega_i)t\}
 \end{aligned} \tag{B.18}$$

Les composantes de distorsion d'intermodulation du troisième ordre générées par les signaux 2 tons sont:

$$n_k = \begin{cases} \pm 2 & \text{pour } n_h \\ \mp 1 & \text{pour } n_i \\ \text{sinon } 0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 i_{IM3}(t) &= rP_{in}L_{opt} \operatorname{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-2} J_2(2m)J_{-1}(2m)e^{j\{(2\omega_h - \omega_i)t + \varphi_{RF1}\}} + \{J_0(2m)\}^{N-2} J_{-2}(2m)J_1(2m)e^{-j\{(2\omega_h - \omega_i)t + \varphi_{RF1}\}} \right] \\
 &= rP_{in}L_{opt} \operatorname{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-2} J_2(2m)J_1(2m) \left[e^{j\{(2\omega_h - \omega_i)t + \varphi_{RF1}\}} - e^{-j\{(2\omega_h - \omega_i)t + \varphi_{RF1}\}} \right] \right] \\
 &= 2rP_{in}L_{opt} \{J_0(2m)\}^{N-2} J_2(2m)J_1(2m) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \sin\{(2\omega_h - \omega_i)t + \varphi_{RF1}\}
 \end{aligned} \tag{B.19}$$

Les composantes de distorsion d'intermodulation du troisième ordre générées par les signaux 3 tons sont:

$$n_k = \begin{cases} \pm 1 & \text{pour } n_h \quad n_i \\ \mp 1 & \text{pour } n_l \\ \text{sinon } 0 \end{cases}$$

$$i_{TB}(t) = -rP_{in}L_{opt} \operatorname{Re} \left[e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \{J_0(2m)\}^{N-3} \{J_2(2m)\}^3 \left\{ e^{j\{(\omega_h + \omega_i - \omega_j)t + \varphi_{RF1}\}} - e^{-j\{(\omega_h + \omega_i - \omega_j)t + \varphi_{RF1}\}} \right\} \right] \quad (B.20)$$

$$= 2rP_{in}L_{opt} \{J_0(2m)\}^{N-3} \{J_1(2m)\}^3 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \sin\{(\omega_h + \omega_i - \omega_j)t + \varphi_{RF1}\}$$

Des Équations (B.15) à (B.20), les rapports de puissance de la composante fondamentale par rapport aux composantes de distorsion sont:

$$\text{2es harmoniques} = \left(\frac{\text{2e composante d'harmonique}}{\text{composante fondamentale}} \right)^2 = \left\{ \frac{J_2(2m)}{J_1(2m)} \tan^{-1}(\varphi_1 - \varphi_2) \right\}^2 \quad (B.21)$$

$$\text{3es harmoniques} = \left(\frac{\text{3e composante d'harmonique}}{\text{composante fondamentale}} \right)^2 = \left\{ \frac{J_3(2m)}{J_1(2m)} \right\}^2 \quad (B.22)$$

$$\text{IM2} = \left(\frac{\text{IMD du deuxième ordre}}{\text{composante fondamentale}} \right)^2 = \left\{ \frac{J_1(2m)}{J_0(2m)} \tan^{-1}(\varphi_1 - \varphi_2) \right\}^2 \quad (B.23)$$

$$\text{IM3} = \left(\frac{\text{IMD du troisième ordre}}{\text{composante fondamentale}} \right)^2 = \left\{ \frac{J_2(2m)}{J_0(2m)} \right\}^2 \quad (B.24)$$

$$\text{Triple battement} = \left(\frac{\text{composante à triple battement}}{\text{composante fondamentale}} \right)^2 = \left\{ \frac{J_1(2m)}{J_0(2m)} \right\}^4 \quad (B.25)$$

Ici, l'indice de modulation optique normalisé (NOMI) est redéfini sous la forme:

$$\text{NOMI} = v_{RF}/v_{\pi RF} \times 100 \text{ [\%]}$$

où v_{RF} est une tension de pilotage et $v_{\pi RF}$ une tension à une demi-longueur d'onde pour la fréquence du signal.

Le rapport de puissance de la composante fondamentale par rapport aux composantes de distorsion est exprimé sous la forme d'une fonction de NOMI,

$$\text{2es harmoniques} = \left\{ \frac{J_2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot \text{NOMI}\right)}{J_1\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot \text{NOMI}\right)} \tan^{-1}(\varphi_1 - \varphi_2) \right\}^2 \quad (B.26)$$

$$\text{3es harmoniques} = \left\{ \frac{J_3\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot \text{NOMI}\right)}{J_1\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot \text{NOMI}\right)} \right\}^2 \quad (B.27)$$

$$IM2 = \left\{ \frac{J_1\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot NOMI\right)}{J_0\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot NOMI\right)} \tan^{-1}(\varphi_1 - \varphi_2) \right\}^2 \quad (B.28)$$

$$IM3 = \left\{ \frac{J_2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot NOMI\right)}{J_0\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot NOMI\right)} \right\}^2 \quad (B.29)$$

$$\text{Triple battement} = \left\{ \frac{J_1\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot NOMI\right)}{J_0\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{100} \cdot NOMI\right)} \right\}^4 \quad (B.30)$$

Par conséquent, IM2 et IM3 sont obtenus en calculant la valeur de NOMI à partir du résultat de mesure de la tension à une demi-longueur d'onde.

Noter que, dans l'Équation (B.28), IM2 dépend des tensions de polarisation et de l'indice de modulation optique normalisé. Si la tension de polarisation s'écarte du point de quadrature (voir Figure B.2), IM2 augmente sensiblement (voir Figure B.3). D'autre part, IM3 ne dépendant pas de la tension de polarisation, il est uniquement déterminé par l'indice de modulation optique normalisé. La dépendance d'IM3 sur l'indice de modulation optique normalisé est représentée à la Figure B.4.

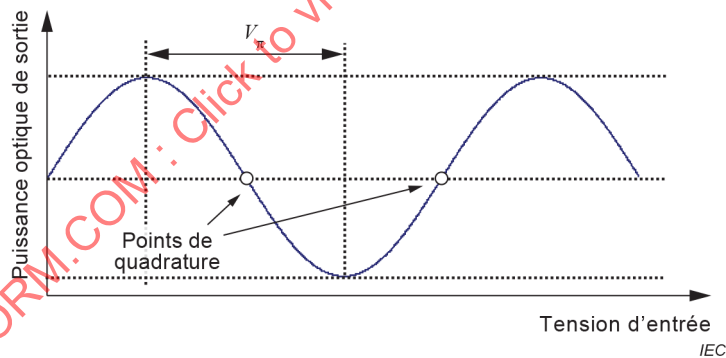


Figure B.2 – Points de quadrature d'une courbe de transfert d'un modulateur optique de Mach-Zehnder