

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Fibre optic communication subsystem test procedures – Digital systems –
Part 2-8: Determination of low BER using Q-factor measurements**

**Procédures d'essai des sous-systèmes de télécommunication à fibres
optiques – Systèmes numériques –
Partie 2-8: Détermination de faible Taux d'Erreur Binaire (TEB) en utilisant
des mesures du facteur Q**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2003 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

Useful links:

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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

It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

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

A propos de la CEI

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

A propos des publications CEI

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

Liens utiles:

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

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

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

Just Published CEI - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Fibre optic communication subsystem test procedures – Digital systems –
Part 2-8: Determination of low BER using Q-factor measurements**

**Procédures d'essai des sous-systèmes de télécommunication à fibres
optiques – Systèmes numériques –
Partie 2-8: Détermination de faible Taux d'Erreur Binaire (TEB) en utilisant
des mesures du facteur Q**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

U

ICS 33.180.10

ISBN 978-2-83220-354-5

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

CONTENTS

FOREWORD.....	4
1 Scope.....	6
2 Definitions and abbreviated terms	6
2.1 Definitions	6
2.2 Abbreviations.....	6
3 Measurement of low bit-error ratios	7
3.1 General considerations	7
3.2 Background to Q-factor.....	8
4 Variable decision threshold method.....	10
4.1 Overview	10
4.2 Apparatus.....	13
4.3 Sampling and specimens	13
4.4 Procedure.....	13
4.5 Calculations and interpretation of results.....	14
4.6 Test documentation	18
4.7 Specification information.....	18
5 Variable optical threshold method.....	18
5.1 Overview	18
5.2 Apparatus.....	19
5.3 Items under test.....	19
5.4 Procedure for basic optical link	19
5.5 Procedure for self-contained system	20
5.6 Evaluation of results	21
Annex A (normative) Calculation of error bound in the value of Q	23
Annex B (informative) Sinusoidal interference method	25
Bibliography	31
Figure 1 – A sample eye diagram showing patterning effects	9
Figure 2 – A more accurate measurement technique using a DSO that samples the noise statistics between the eye centres	9
Figure 3 – Bit error ratio as a function of decision threshold level.....	11
Figure 4 – Plot of Q-factor as a function of threshold voltage	11
Figure 5 – Set-up for the variable decision threshold method	13
Figure 6 – Set-up of initial threshold level (approximately at the centre of the eye)	13
Figure 7 – Effect of optical bias	18
Figure 8 – Set-up for optical link or device test	20
Figure 9 – Set-up for system test.....	20
Figure 10 – Extrapolation of log BER as function of bias	22
Figure B.1 – Set-up for the sinusoidal interference method by optical injection	26
Figure B.2 – Set-up for the sinusoidal interference method by electrical injection	28
Figure B.3 – BER Result from the sinusoidal interference method (data points and extrapolated line).....	29
Figure B.4 – BER versus optical power for three methods.....	30

Table 1 – Mean time for the accumulation of 15 errors as a function of BER and bit rate	7
Table 2 – BER as function of threshold voltage.....	15
Table 3 – f_i as a function of D_i	16
Table 4 – Values of linear regression constants.....	16
Table 5 – Mean and standard deviation	17
Table 6 – Example of optical bias test	21
Table B.1 – Results for sinusoidal injection.....	27

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 61280-2-8:2003

Withdrawing

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**FIBRE OPTIC COMMUNICATION SUBSYSTEM TEST PROCEDURES –
DIGITAL SYSTEMS –****Part 2-8: Determination of low BER
using Q-factor measurements**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organisation for standardisation comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardisation in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. 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 organisations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organisation for Standardisation (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organisations.
- 2) The formal decisions or agreements of the 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 National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61280-2-8 has been prepared by subcommittee 86C: Fibre optic systems and active devices, of IEC technical committee 86: Fibre optics.

This bilingual version (2012-09) corresponds to the monolingual English version, published in 2003-02.

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

FDIS	Report on voting
86C/485/FDIS	86C/505/RVD

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

The French version of this standard has not been voted upon.

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

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2010. At this date, the publication will be

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

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

Withd
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 61280-2-8:2003

FIBRE OPTIC COMMUNICATION SUBSYSTEM TEST PROCEDURES – DIGITAL SYSTEMS –

Part 2-8: Determination of low BER using Q-factor measurements

1 Scope

This part of IEC 61280 specifies two main methods for the determination of low BER values by making accelerated measurements. These include the variable decision threshold method (Clause 4) and the variable optical threshold method (Clause 5). In addition, a third method, the sinusoidal interference method, is described in Annex B.

2 Definitions and abbreviated terms

2.1 Definitions

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

2.1.1

amplified spontaneous emission

ASE

impairment generated in optical amplifiers

2.1.2

bit error ratio

BER

the number bits in error as a ratio of the total number of bits

2.1.3

intersymbol interference

ISI

mutual interference between symbols in a data stream, usually caused by non-linear effects and bandwidth limitations of the transmission path

2.1.4

Q-factor

Q

ratio of the difference between the mean voltage of the 1 and 0 rails, and the sum of their standard deviation values

2.2 Abbreviations

cw	Continuous wave (normally referring to a sinusoidal wave form)
DC	Direct current
DSO	Digital sampling oscilloscope
DUT	Device under test
PRBS	Pseudo-random binary sequence

3 Measurement of low bit-error ratios

3.1 General considerations

Fibre optic communication systems and subsystems are inherently capable of providing exceptionally good error performance, even at very high bit rates. The mean bit error ratio (BER) may typically lie in the region 10^{-12} to 10^{-20} , depending on the nature of the system. While this type of performance is well in excess of practical performance requirements for digital signals, it gives the advantage of concatenating many links over long distances without the need to employ error correction techniques.

The measurement of such low error ratios presents special problems in terms of the time taken to measure a sufficiently large number of errors to obtain a statistically significant result. Table 1 presents the mean time required to accumulate 15 errors. This number of errors can be regarded as statistically significant, offering a confidence level of 75 % with a variability of 50 %.

**Table 1 – Mean time for the accumulation of 15 errors
as a function of BER and bit rate**

BER Bits/s	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}	10^{-13}	10^{-14}	10^{-15}
1,0M	1,5 s	15 s	2,5 min	25 min	4,2 h	1,7 d	17 d	170 d	4,7 years	47 years
2,0M	750 ms	7,5 s	75 s	750 s	2,1 h	21 h	8,8 d	88 d	2,4 years	24 years
10M	150 ms	1,5 s	15 s	2,5 min	25 min	4,2 h	1,7 d	17 d	170 d	4,7 years
50M	30 ms	300 ms	3,0 s	30 s	5,0 min	50 min	8,3 h	3,5 d	35 d	350 d
100M	15 ms	150 ms	1,5 s	15 s	2,5 min	25 min	4,2 h	1,7 d	17 d	170 d
500M	3 ms	30 ms	300 ms	3,0 s	30 s	5,0 min	50 min	8,3 h	3,5 d	35 d
1,0G	1,5 ms	15 ms	150 ms	1,5 s	15 s	2,5 min	25 min	4,2 h	1,7 d	17 d
10G	150 μ s	1,5 ms	15 ms	150 ms	1,5 s	15 s	2,5 min	25 min	4,2 h	1,7 d
40G	38 μ s	380 μ s	3,8 ms	38 ms	380 ms	3,8 s	38 s	6,3 min	63 min	10,4 h
100G	15 μ s	150 μ s	1,5 ms	15 ms	150 ms	1,5 s	15 s	2,5 min	25 min	4,2 h

The times given in Table 1 show that the direct measurement of the low BER values expected from fibre optic systems is not practical during installation and maintenance operations. One way of overcoming this difficulty is to artificially impair the signal-to-noise ratio at the receiver in a controlled manner, thus significantly increasing the BER and reducing the measurement time. The error performance is measured for various levels of impairment, and the results are then extrapolated to a level of zero impairment using computational or graphical methods according to theoretical or empirical regression algorithms.

The difficulty presented by the use of any regression technique for the determination of the error performance is that the theoretical BER value is related to the level of impairment via the inverse error function (*erfc*). This means that very small changes in the impairment lead to very large changes in BER; for example, in the region of a BER value of 10^{-15} a change of approximately 1 dB in the level of impairment results in a change of three orders of magnitude in the BER. A further difficulty is that a method based on extrapolation is unlikely to reveal a levelling off of the BER at only about 3 orders of magnitude below the lowest measured value.

It should also be noted that, in the case of digitally regenerated sections, the results obtained apply only to the regenerated section whose receiver is under test. Errors generated in upstream regenerated sections may generate an error plateau which may have to be taken into account in the error performance evaluation of the regenerator section under test.

As noted above, two main methods for the determination of low BER values by making accelerated measurements are described. These are the variable decision threshold method (Clause 4) and the variable optical threshold method (Clause 5). In addition, a third method, the sinusoidal interference method, is described in Annex B.

It should be noted that these methods are applicable to the determination of the error performance in respect of amplitude-based impairments. Jitter may also affect the error performance of a system, and its effect requires other methods of determination. If the error performance is dominated by jitter impairments, the amplitude-based methods described in this standard will lead to BER values which are lower than the actual value.

The variable decision threshold method is the procedure which can most accurately measure the Q-factor and the BER for optical systems with unknown or unpredictable noise statistics. A key limitation, however, to the use of the variable threshold method to measure Q-factor and BER is the need to have access to the receiver electronics in order to manipulate the decision threshold. For systems where such access is not available it may be useful to utilize the alternative variable optical threshold method. Both methods are capable of being automated in respect of measurement and computation of the results

3.2 Background to Q-factor

The Q-factor is the signal-to-noise ratio (SNR) at the decision circuit and is typically expressed as [3]¹:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (1)$$

where μ_1 and μ_0 are the mean voltage levels of the “1” and “0” rails, respectively, and σ_1 and σ_0 are the standard deviation values of the noise distribution on the “1” and “0” rails, respectively.

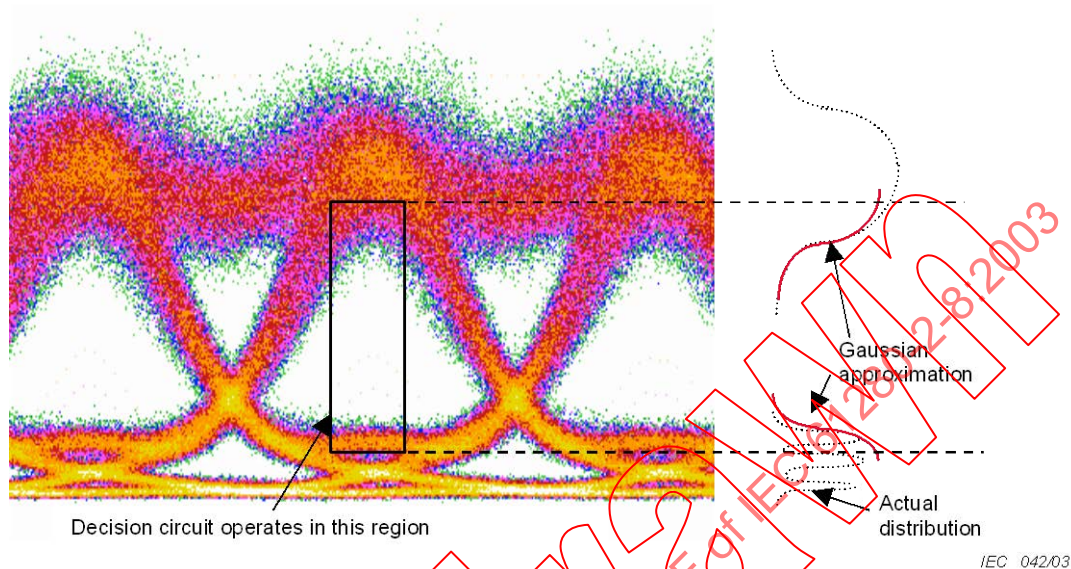
An accurate estimation of a system's transmission performance, or Q-factor, must take into consideration the effects of all sources of performance degradation, both fundamental and those due to real-world imperfections. Two important sources are amplified spontaneous emission (ASE) noise and intersymbol interference (ISI). Additive noise originates primarily from ASE of optical amplifiers. ISI arises from many effects, such as chromatic dispersion, fibre non-linearities, multi-path interference, polarization-mode dispersion and use of electronics with finite bandwidth. There may be other effects as well, for example, a poor impedance match can cause impairments such as long fall times or ringing on a waveform.

One possible method to measure Q-factor is the voltage histogram method in which a digital sampling oscilloscope is used to measure voltage histograms at the centre of a binary eye to estimate the waveform's Q-factor [4]. In this method, a pattern generator is used as a stimulus and the oscilloscope is used to measure the received eye opening and the standard deviation of the noise present in both voltage rails. As a rough approximation, the edge of visibility of the noise represents the 3σ points of an assumed Gaussian distribution. The advantage of using an oscilloscope to measure the eye is that it can be done rapidly on real traffic with a minimum of equipment.

The oscilloscope method for measuring the Q-factor has several shortcomings. When used to measure the eye of high-speed data (of the order of several Gbit/s), the oscilloscope's limited digital sampling rate (often in the order of a few hundred kilohertz) allows only a small minority of the high-speed data stream to be used in the Q-factor measurement. Longer observation times could reduce the impact of the slow sampling. A more fundamental shortcoming is that the Q estimates derived from the voltage histograms at the eye centre are often inaccurate. Various patterning effects and added noise from the front-end electronics of the oscilloscope can often obscure the real variance of the noise.

¹ Figures in square brackets refer to the bibliography.

Figure 1 shows a sample eye diagram made on an operating system. It can be seen in this figure that the vertical histograms through the centre of the eye show patterning effects (less obvious is the noise added by the front-end electronics of the oscilloscope). It is difficult to predict the relationship between the Q measured this way and the actual BER measured with a test set.



NOTE The data for measuring the Q-factor is obtained from the tail of the Gaussian distributions.

Figure 1 – A sample eye diagram showing patterning effects

Figure 2 shows another possible way of measuring Q-factor using an oscilloscope. The idea is to use the centre of the eye to estimate the eye opening and use the area between eye centres to estimate the noise. Pattern effect contributions to the width of the histogram would then be reduced. A drawback to this method is that it relies on measurements made on a portion of the eye that the receiver does not really ever use.

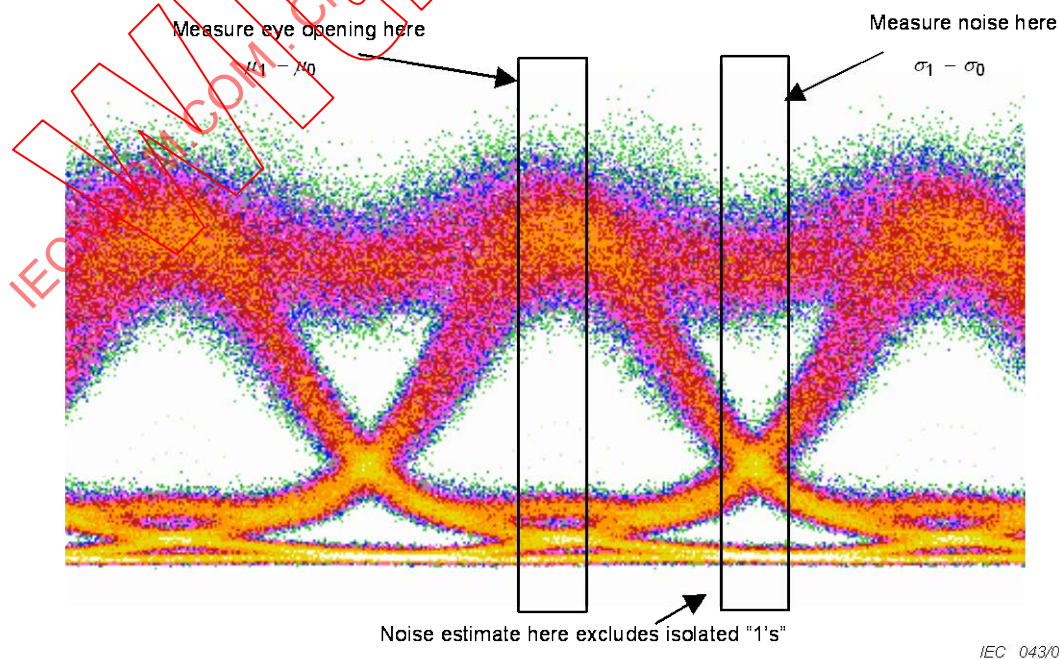


Figure 2 – A more accurate measurement technique using a DSO that samples the noise statistics between the eye centres

It is tempting to conclude that the estimates for σ_1 and σ_0 would tend to be overestimated and that the resulting Q measurements would always form a lower bound to the actual Q for either of these oscilloscope-based methods. That is not necessarily the case. It is possible that the histogram distributions can be distorted in other ways, for example, skewed in such a way that the mean values overestimate the eye opening – and the resulting Q will actually not be a lower bound. There is, unfortunately, no easily characterized relationship between oscilloscope-derived Q measurements and BER performance.

4 Variable decision threshold method

4.1 Overview

This method of estimating the Q-factor relies on using a receiver front-end with a variable decision threshold. Some means of measuring the BER of the system is required. Typically the measurement is performed with an error test set using a pseudo-random binary sequence (PRBS), but there are alternate techniques which allow operation with live traffic. The measurement relies on the fact that for a data eye with Gaussian statistics, the BER may be calculated analytically as follows:

$$BER(V_{th}) = \frac{1}{2} \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{|V_{th} - \mu_1|}{\sigma_1} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{|V_{th} - \mu_0|}{\sigma_0} \right) \right) \quad (2)$$

where

μ_1 , μ_0 and σ_1 , σ_0 are the mean and standard deviation of the “1” and “0” data rails;

V_{th} is the decision threshold level;

$\operatorname{erfc}(\cdot)$ is the complementary error function given by

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\beta^2/2} d\beta \cong \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} \quad (3)$$

(The approximation is nearly exact for $x > 3$.)

The BER, given in equation 2, is the sum of two terms. The first term is the conditional probability of deciding that a “0” has been received when a “1” has been sent, and the second term is the probability of deciding that a “1” has been received when a “0” has been sent.

In order to implement this technique, the BER is measured as a function of the threshold voltage (see Figure 3). Equation 2 is then used to convert the data into a plot of the Q-factor versus threshold, where the Q-factor is the argument of the complementary error function of either term in equation 2. To make the conversion, the approximation is made that the BER is dominated by only one of the terms in equation 2 according to whether the threshold is closer to the “1’s” or the “0’s” rail of the eye diagram.

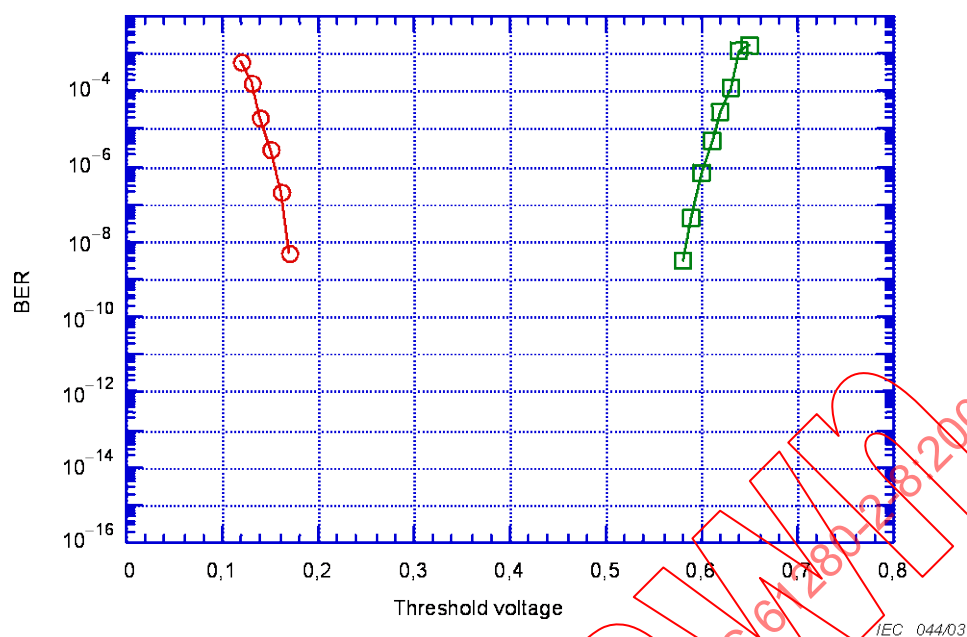


Figure 3 – Bit error ratio as a function of decision threshold level

Figure 4 shows the results of converting the data in Figure 3 into a plot of Q-factor versus threshold. The optimum Q-factor value as well as the optimum threshold setting needed to achieve this Q-factor is obtained from the intersection of the two best-fit lines through the data. This technique is described in detail in [2].

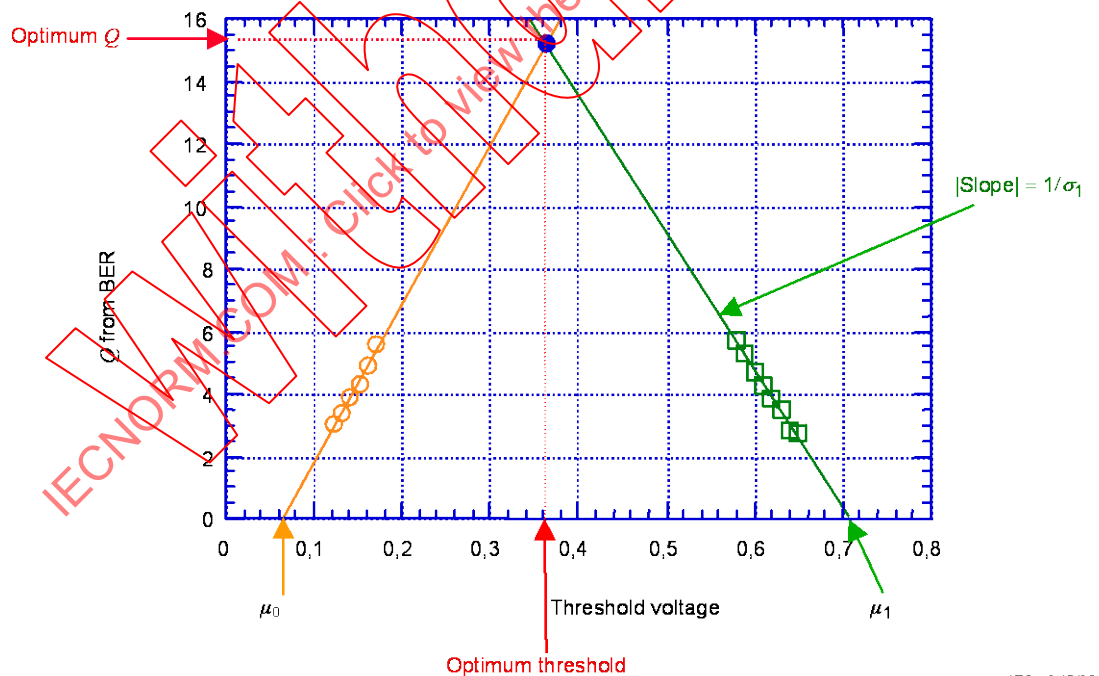


Figure 4 – Plot of Q-factor as a function of threshold voltage

The optimum threshold as well as the optimal Q can be obtained analytically by making use of the following approximation [1] for the inverse error function:

$$\left[\log \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(x) \right\} \right]^{-1} \approx 1,192 - 0,6681x - 0,0162x^2 \quad (4)$$

where x is the $\log(\text{BER})$.

NOTE Equation (4) is accurate to $\pm 0,2$ % over the range of BER from 10^{-5} to 10^{-10} .

After evaluating the inverse error function, the data is plotted against the decision threshold level, V_{th} . As shown in Figure 4, a straight line is fitted to each set of data by linear regression. The equivalent variance and mean for the Q calculation are given by the slope and intercept respectively.

The minimum BER can be shown to occur at an optimal threshold, $V_{\text{th-optimal}}$, when the two terms in the argument in equation 2 are equal, that is

$$\frac{(\mu_1 - V_{\text{th-optimal}})}{\sigma_1} = \frac{(V_{\text{th-optimal}} - \mu_0)}{\sigma_0} = Q_{\text{opt}} \quad (5)$$

An explicit expression for $V_{\text{th-optimal}}$ in terms of $\mu_{1,0}$ and $\sigma_{1,0}$ can be derived from equation (5) to be:

$$V_{\text{th-optimal}} = \frac{\sigma_0 \mu_1 + \sigma_1 \mu_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad (6)$$

The value of Q_{opt} is obtained from equation 1. The residual BER at the optimal threshold can be obtained from equation 2 and is approximately

$$\text{BER}_{\text{optimal}} \cong \frac{e^{-(Q_{\text{opt}}^2/2)}}{Q_{\text{opt}} \sqrt{2\pi}} \quad (7)$$

NOTE This approximation is nearly exact for $Q_{\text{opt}} > 3$.

It should be noted that even though the variable threshold method makes use of Gaussian statistics, it provides accurate results for systems that have non-Gaussian noise statistics as well, for example, the non-Gaussian statistics that occur in a typical optically amplified system [4]. This can be understood by examining Figure 1. The decision circuit of a receiver operates only on the interior region of the eye. This means that the only part of the vertical histogram that it uses is the “tail” that extends into the eye. The variable decision threshold method amounts to constructing a Gaussian approximation to the tail of the real distribution in the centre region of the eye where it affects the receiver operation directly. As the example in Figure 1 shows, this Gaussian approximation will not reproduce the actual histogram distribution at all, but it does not need to, for purposes of Q estimation.

Another way to view the variable decision threshold technique is to imagine replacing the real data eye with a fictitious eye having Gaussian statistics. The two eye diagrams have the same BER versus decision threshold voltage behaviour, so it is reasonable to assign them the same equivalent Q value, even though the details of the full eye diagram may be very different. Of course, it does need to be kept in mind that this analysis will not work for systems dominated by noise sources whose “tails” are not easily approximated to be Gaussian in shape; as, for example, would occur in a system dominated by cross-talk or modal noise. In taking these measurements, an inability to fit the data of Q -factor versus threshold to a straight line would provide a good indication of the presence of such noise sources.

Experimentally it has been found that the Q values measured using the variable decision threshold method have a statistically valid level of correlation with the actual BER measurements.

4.2 Apparatus

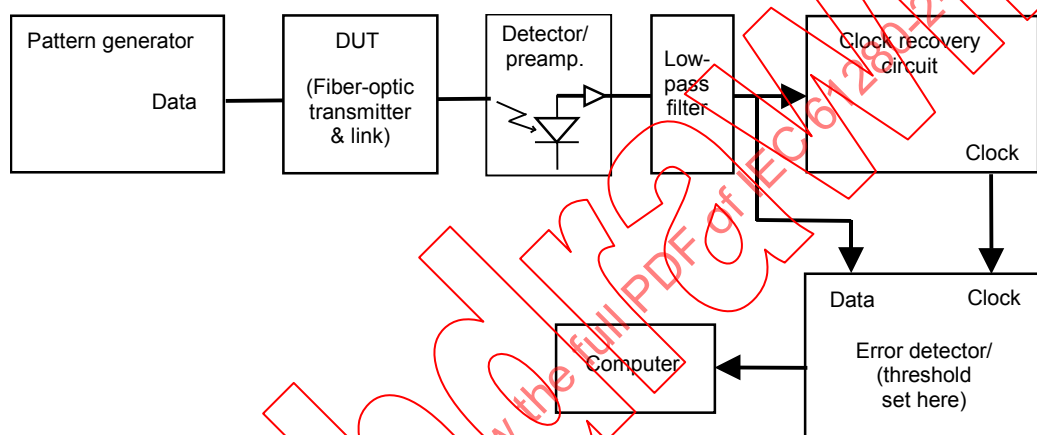
An error performance analyser consisting of a pattern generator and a bit error rate detector.

4.3 Sampling and specimens

The device under test (DUT) is a fibre optic digital system, consisting of an electro-optical transmitter at one end and an opto-electronic receiver at the other end. In between the transmitter and the receiver can be an optical network with links via optical fibres (for example, a DWDM network).

4.4 Procedure

Data for the “ Q ” measurement is collected at both the top “1” and bottom “0” regions of the eye as BER (over the range 10^{-5} to 10^{-10}) versus decision threshold. The equivalent mean (μ) and variance (σ) of the 1s and 0s are determined by fitting this data to a Gaussian characteristic.



IEC 046/03

Figure 5 – Set-up for the variable decision threshold method

The Q-factor is then calculated using equation 1.

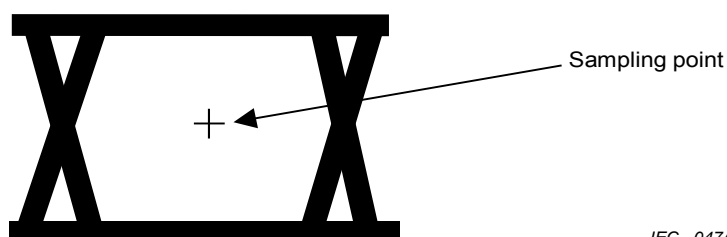
Connect the pattern generator and error detector to the system under test in accordance with figure 5.

Set the clock source to the desired frequency.

Set up the pattern generator's pattern, data and clock amplitude, offset, polarity and termination as required.

Set up the error detector's pattern, data polarity and termination as required.

Set the decision threshold voltage and data input delay to achieve a sampling point that is approximately in the centre of the data eye as shown in Figure 6. This is the initial sampling point.



IEC 047/03

Figure 6 – Set-up of initial threshold level (approximately at the centre of the eye)

Enable the error detector's gating function and set it to gate by errors, for a minimum of 10, 100 or 1 000 errors.

Adjust the error detector's decision threshold voltage in a positive direction until the measured BER increases to a value greater than 1×10^{-10} . Note the decision threshold voltage (V_{b1}) and BER.

Increase the decision threshold voltage until the BER rises above 10^{-5} and note the decision threshold voltage (V_{a1}) and the BER.

Note the difference between the two threshold values V_{a1} and V_{b1} and choose a step size (V_{step1}) that provides a reasonable number (greater than 5) of measurement points between these two decision threshold extremes. Starting from the threshold value V_{a1} decrease the threshold value by the step size, V_{step1} . At each step run a gating measurement on the error detector. Record the measured BER value and the corresponding decision threshold voltage.

The Gating measurement from the error detector accumulates data and error information until the minimum number of errors (as specified in 5.5) have been recorded. Selecting a larger minimum number of errors provides a statistically more accurate BER but at the expense of measurement time, particularly when measuring the low BER values. For a statistically significant result, the number of errors counted should not be less than 15.

Continue until the measured BER falls below 10^{-10} . This set of decision threshold voltage versus BER is the "1" data set.

Adjust decision threshold voltage back to the initial sampling point value and then continue in a negative direction until the BER increases again to greater than 10^{-10} . Note down the threshold value (V_{b0}) and BER.

Decrease the decision threshold voltage until the BER rises above 10^{-5} and note the decision threshold voltage (V_{a0}) and the BER.

Note the difference between the two threshold values V_{a0} and V_{b0} and choose a step size (V_{step0}) that provides reasonable number (greater than 5) of measurement points between these two decision threshold extremes. Starting from the threshold value V_{a0} , increase the threshold value by the step size, V_{step0} . At each step run a gating measurement on the error detector. Record the measured BER and the corresponding decision threshold voltage.

Continue until the measured BER falls below 1×10^{-10} . This set of decision threshold voltage versus BER is the "0" data set.

4.5 Calculations and interpretation of results

4.5.1 Sets of data

The procedure in 4.7 provides two sets (for the "0" and "1" rails) of data in the form:

$$\begin{bmatrix} D_1, BER_1 \\ D_2, BER_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ D_n, BER_n \end{bmatrix}$$

where

D_i is the decision threshold voltage for " i "-th reading (for $i = 1, 2, \dots, n$);

BER_i is the bit error rate for " i "-th reading (for $i = 1, 2, \dots, n$);

n is the total number of data pairs.

NOTE The total number of data pairs for the "0" and "1" rails need not be equal.

As an example, the following voltage and BER values were obtained in a real-life experiment.

Table 2 – BER as function of threshold voltage

“1” rail		“0” rail	
Threshold voltage V	BER	Threshold voltage V	BER
–1,75	5,18E-05	–4,37	8,76E-05
–1,80	2,09E-05	–4,34	1,90E-05
–1,85	7,33E-06	–4,31	5,18E-06
–1,90	2,77E-06	–4,28	1,06E-06
–1,95	9,61E-07	–4,25	2,12E-07
–2,00	1,96E-07	–4,22	3,45E-08
–2,05	6,30E-08	–4,19	3,52E-09
–2,10	1,95E-08	–4,16	2,77E-10
–2,15	3,45E-09		
–2,20	1,39E-09		

4.5.2 Convert BER using inverse error function

Each BER value is then converted through an inverse error function, using the following approximation given in equation 4.

$$f_i = \left[\log \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(x_i) \right\} \right]^{-1} = 1,192 - 0,6681\{x_i\} - 0,0162\{x_i\}^2 \quad (8)$$

where $x_i = \log_{10}(\operatorname{BER}_i)$.

This will produce two sets of data (for the “1” and “0”) of the form:

$$\begin{bmatrix} D_1, f_1 \\ D_2, f_2 \\ \vdots \\ D_n, f_n \end{bmatrix}$$

that should approximately fit a straight line.

Using the values given in Table 2, we get the following sets of data.

Table 3 – f_i as a function of D_i

“1” rail		“0” rail	
D_i (volts)	f_i	D_i (volts)	f_i
–1,75	3,7578	–4,37	3,6360
–1,80	3,9638	–4,34	3,9847
–1,85	4,1956	–4,31	4,2706
–1,90	4,4043	–4,28	4,6052
–1,95	4,6257	–4,25	4,9293
–2,00	4,9449	–4,22	5,2757
–2,05	5,1629	–4,19	5,6823
–2,10	5,3799	–4,16	6,0975
–2,15	5,6858		
–2,20	5,8390		

4.5.3 Linear regression

Using the above data, a linear regression technique is used to fit, in turn, each set of data to a straight line with an equation of the form:

$$Y = A + BX$$

where

$Y = \text{erfc}(\text{BER})$ (inverse error function of BER),

$X = D$ (decision threshold voltage)

With n points of data per set, then, for both the top (“1”) and bottom (“0”) data sets, the following calculations should be performed [6]:

$$B = \frac{\sum XY - \frac{(\sum X)(\sum Y)}{n}}{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n}} \quad R^2 = \frac{\left(\sum XY - \frac{(\sum X)(\sum Y)}{n} \right)^2}{\left(\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n} \right) \left(\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n} \right)}$$

$$A = \frac{\sum Y}{n} - B \frac{\sum X}{n}$$

where

R^2 is the coefficient of determination (a measure of how well the data fits a straight line);

$\sum$ is the sum of values from 1 to n .

Using the values given in Table 3, we get:

Table 4 – Values of linear regression constants

“1” rail			“0” rail		
A	B	R	A	B	R
–4,6125	–4,7638	0,9989	53,989	11,5307	0,9984

4.5.4 Standard deviation and mean

$$\sigma = \left| -\frac{1}{B} \right| \quad (\text{standard deviation of "1" or "0" noise region}),$$

$$\mu = \frac{-A}{B} \quad (\text{mean of "1" or "0" noise region}).$$

Calculate μ_1, σ_1 from the "1" set of data and μ_0, σ_0 from the "0" set of data.

Using the example in Table 4, we get:

Table 5 – Mean and standard deviation

"1" rail		"0" rail	
μ_1	σ_1	μ_0	σ_0
–0,9682	0,2099	–4,6822	0,0867249

4.5.5 Optimum decision threshold

$$Q_{\text{opt}} = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

$$\text{And thus the optimum decision threshold} = \frac{\sigma_0 \mu_1 + \sigma_1 \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

For the example given earlier, using the value derived for Q_{opt} of 12.52, the optimal decision threshold is –3,596 volts.

4.5.6 BER optimum decision threshold

Also the predicted residual BER at the optimum decision threshold is given by

$$\text{BER} = \frac{e^{-\left(\frac{Q^2}{2}\right)}}{Q_{\text{opt}} \sqrt{2\pi}}$$

Assuming the value of 12,52 for Q_{opt} in our example data, the residual BER is calculated to be less than 1×10^{-18} .

4.5.7 BER non-optimum decision threshold

The BER value at decision threshold voltages other than the optimum can be calculated from the following formula:

$$\text{BER}(D) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{e^{-\left(\frac{(\mu_1 - D)^2}{\sigma_1^2}\right)}}{\left(\frac{|\mu_1 - D|}{\sigma_1}\right) \sqrt{2\pi}} + \frac{e^{-\left(\frac{(\mu_0 - D)^2}{\sigma_0^2}\right)}}{\left(\frac{|\mu_0 - D|}{\sigma_0}\right) \sqrt{2\pi}} \right\}$$

4.5.8 Error bound

Using the formula in Annex A (equation A.5), one can derive the error bound on the derived value of Q -optimum.

For the example shown, the absolute error bound on Q is $\pm 0,5$.

4.6 Test documentation

Report the following information for each test.

- a) Test date
- b) This document number
- c) Specimen/sample (that is, optical transmission system being tested) identification
- d) Two sets of data; one above the optimal threshold and the other below
- e) Each data set should contain at least 5 readings of threshold versus BER (for BER values varying from 10^{-5} to 10^{-10})
- f) Report optimal Q as well as the optimal decision threshold
- g) Report possible error range in the value of Q

4.7 Specification information

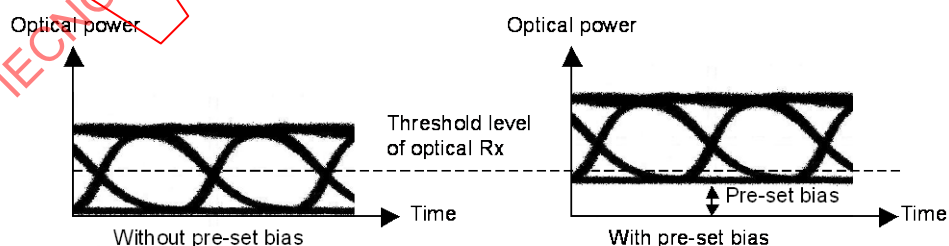
The following details shall be specified.

- a) IEC document number
- b) Any special test requirements
- c) Failure or acceptance criteria

5 Variable optical threshold method

5.1 Overview

This method consists of the optical addition of an interfering pre-set bias light to the received optical signal in order to increase the measured BER. Measurements taken at several values of bias light are extrapolated to zero bias, to evaluate the BER value for normal operation. This method is applicable to d.c.-coupled receivers only. The effect of adding a pre-set bias is shown in Figure 7.



IEC 048/03

Figure 7 – Effect of optical bias

The method can be used to evaluate the error performance of an optical link or active device as shown in Figure 1. Alternatively, the error performance of a complete system can be evaluated using the set-up shown in Figure 2. The advantage of this method is that no internal access to equipment is required and that any internal error monitoring facility of the system under test can be utilized. If this is not available, conventional error-measuring equipment can be connected to the data input and output terminations of the system.

5.2 Apparatus

Common to all methods is the conventional error measurement equipment: a pattern generator and an error detector.

- a) Conventional error measuring test equipment consisting of a pattern generator and separate error detector suitable for remote use. This is not required for system evaluation with self-contained error-monitoring facility.
- b) A pre-set light source, stable to 0,1 dB over 1 h, of a wavelength similar to the system under test.
- c) An optical attenuator stable to 0,1dB over 1 h. An additional attenuator with equivalent stability may be required in the case of high signal levels at the receiver, for example, when testing a transmitter receiver pair.
- d) An optical splitter/combiner with split ratios typically between 50:50 and 10:90, and with fibre compatible with that of the system and the pre-set bias light source.

5.3 Items under test

The item under test may be a digital fibre optic system consisting of a digital transmitter and a d.c. coupled digital receiver which are connected via an optical link consisting of fibre or cable and may also include passive or active components. If a transmitter/receiver pair alone is to be tested, they should be connected via a fixed or variable optical attenuator.

The item under test may also be a self-contained transmission system comprising transmit and receive terminals connected via an optical link which itself may contain active devices such as regenerators and/or optical amplifiers. Such system may include internal error monitoring facilities.

5.4 Procedure for basic optical link

Refer to Figure 8.

- a) Operate the transmitter and receiver, adjusting the received signal with the optical attenuator. It may be necessary to monitor the input power of the optical signal at the receiver.
- b) Adjust the pre-set bias light until a predetermined high value of BER, such as 10^{-4} , is reached.
- c) Decrease the bias a step at a time, and at each step record the BER measured by the error detector. Measure at least 5 data pairs, with the BER values to 2 significant figures.
- d) Repeat 3.

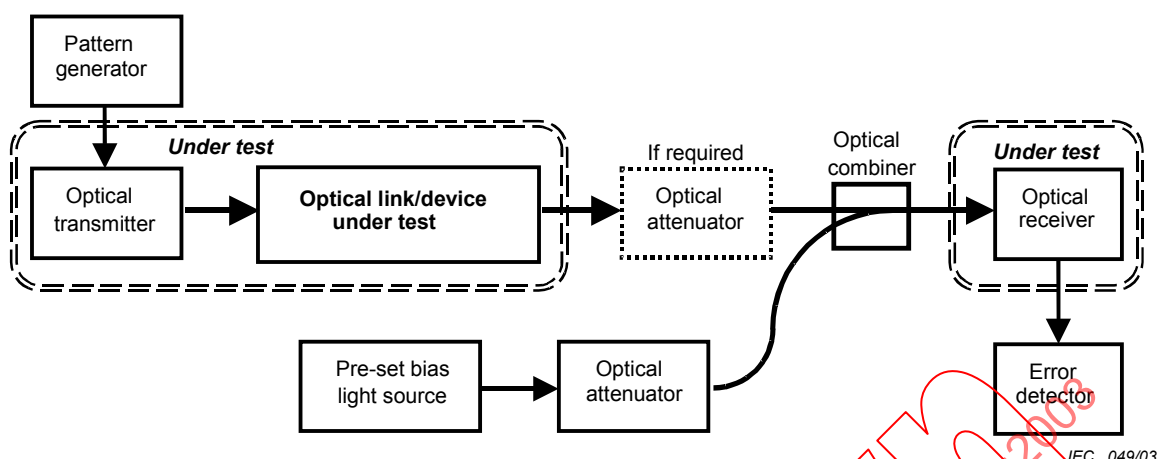
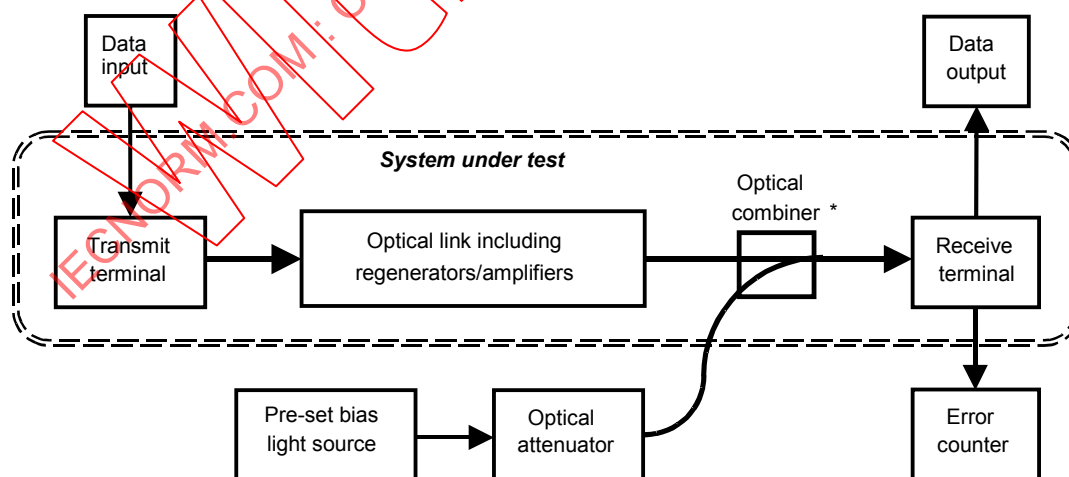


Figure 8 – Set-up for optical link or device test

5.5 Procedure for self-contained system

Refer to Figure 9.

- Set up the system for normal operation. If no optical combiner is incorporated, insert such a device at the input terminal of the receiver. If the system does not contain error monitoring facilities, connect a pattern generator to a data input of the transmit terminal and the corresponding error detector to the appropriate data output terminal.
- Adjust the pre-set bias light until a predetermined high value of BER, such as 10^{-4} , is reached.
- Decrease the bias a step at a time, and at each step record the BER measured by the error detector. Measure at least 5 data pairs, with the BER values to 2 significant figures.
- Repeat 3.



* To be inserted if system is not equipped with an optical combiner

IEC 050/03

Figure 9 – Set-up for system test

5.6 Evaluation of results

The injection of an optical bias signal is, in essence, similar to a variation in the detection threshold. Thus, the mathematical model for the evaluation of the results is substantially the same as that used for the variable threshold method. To a first-order approximation, therefore, the relationship between the amplitude of the optical bias signal and the resulting value of BER can be represented by the equation:

$$Y = A + BX,$$

where

Y is the log BER;

X is the bias amplitude.

An example of a set of results is given in Table 6.

Table 6 – Example of optical bias test

Bias	BER	Log BER
6,00 μW	$1,0 \times 10^{-4}$	4,00
5,75 μW	$2,7 \times 10^{-5}$	4,57
5,50 μW	$7,0 \times 10^{-6}$	5,15
5,25 μW	$1,4 \times 10^{-6}$	5,85
5,00 μW	$3,0 \times 10^{-7}$	6,52
4,75 μW	$5,0 \times 10^{-8}$	7,30
4,50 μW	$1,0 \times 10^{-8}$	8,00

In order to achieve a precision to two significant digits for the BER values, it is necessary to accumulate sufficient errors, approximately 100, to achieve consistency. The time taken to measure errors must, however, not compromise the stability of the amplitude of the optical bias, since small variations in this amplitude can have a large effect on the subsequent extrapolation procedure.

Using the results given in Table 6, and applying the linear regression techniques described in 2.5.3 the basic value of BER can be determined by extrapolation as shown in Figure 9.

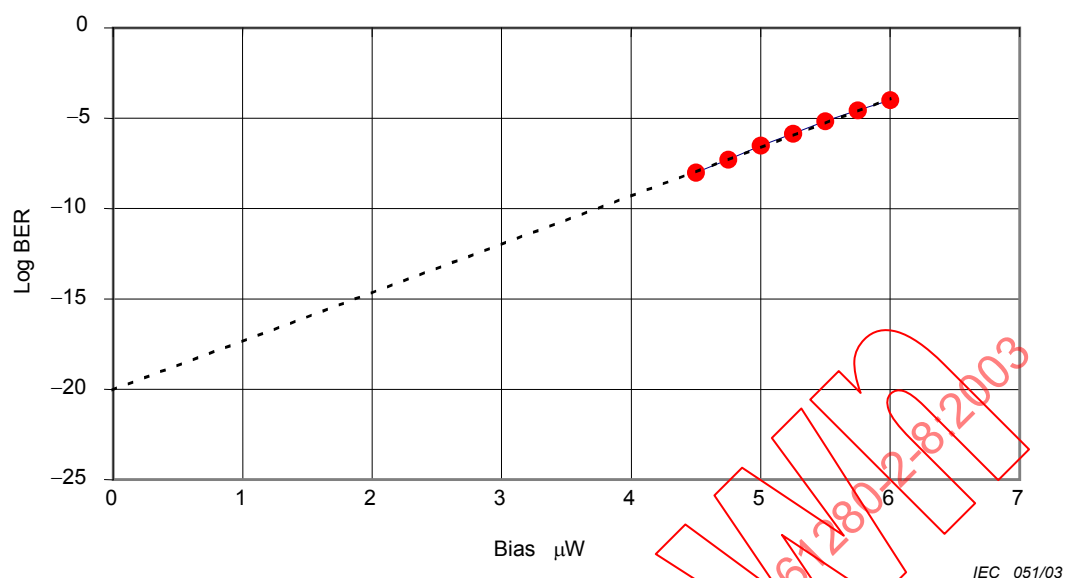


Figure 10 – Extrapolation of log BER as function of bias

For the results given in Table 6, the BER value, as shown by the extrapolation in Figure 9, is predicted to be 10^{-20} .

Annex A (normative)

Calculation of error bound in the value of Q

Let us assume that the linear regression fit (of form $Y = A + BX$) gives rise to two straight line fits for the “0” and “1” rail as follows:

$$\begin{aligned} Y_0 &= A_0 + B_0 X && \text{(for the "0" rail)} \\ Y_1 &= A_1 + B_1 X && \text{(for the "1" rail)} \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

As shown in Figure 4, the two lines intersect at the point X_{optimal} , the optimal decision threshold. At this value of X , both Y_0 and Y_1 are equal, that is

$$\begin{aligned} A_0 + B_0 X_{\text{optimal}} &= A_1 + B_1 X_{\text{optimal}} \quad \text{or} \\ X_{\text{optimal}} &= \frac{A_1 - A_0}{B_0 - B_1} \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

The value of Y at the optimal threshold is Q , that is

$$\begin{aligned} Q &= A_1 + B_1 X_{\text{optimal}} \\ &= \frac{A_1 B_0 - A_0 B_1}{B_0 - B_1} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

The derivatives of Q with respect to each of the variables A_0 , A_1 , B_0 and B_1 are

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial A_0} &= \alpha, \quad \frac{\partial Q}{\partial A_1} = \beta \\ \frac{\partial Q}{\partial B_0} &= -\alpha\gamma, \quad \frac{\partial Q}{\partial B_1} = -\beta\gamma \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

where $\alpha = -\frac{B_1}{B_0 - B_1}$, $\beta = \frac{B_0}{B_0 - B_1}$ and $\gamma = \frac{A_0 - A_1}{B_0 - B_1}$

The maximum error in Q , given by ΔQ_{max} , can be bounded by

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\text{max}}^2 &= \left(\frac{\partial Q}{\partial A_0} \right)^2 \sigma_{A_0}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial A_1} \right)^2 \sigma_{A_1}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial B_0} \right)^2 \sigma_{B_0}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial B_1} \right)^2 \sigma_{B_1}^2 \\ &= \alpha^2 (\gamma^2 \sigma_{B_0}^2 + \sigma_{A_0}^2) + \beta^2 (\gamma^2 \sigma_{B_1}^2 + \sigma_{A_1}^2) \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

where

$\sigma_{A_0}^2$ and $\sigma_{A_1}^2$ are the uncertainties in the Y-intercepts for the “0” and “1” rails, respectively;

$\sigma_{B_0}^2$ and $\sigma_{B_1}^2$ are the uncertainties in the slopes of the “0” and “1” rails. It is assumed that the factors A_0 , A_1 , B_0 and B_1 are uncorrelated. Equation A.5 gives the absolute maximum spread in the value of Q .

These variances are given in [7] to be:

$$\sigma_A^2 \cong \frac{S^2 \sum X^2}{\Delta} \quad \text{and} \quad \sigma_B^2 \cong \frac{N \cdot S^2}{\Delta} \quad (\text{A.6})$$

where N is the number of data points

$$\Delta = N \sum X^2 - (\sum X)^2 \text{ and}$$

$$S^2 = \frac{1}{N-2} \sum (Y - A - BX)^2$$

Withdrawn
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 61280-2-8:2003

Annex B (informative)

Sinusoidal interference method

B.1 Introduction

This method, optically or electrically, adds an interfering sinusoidal signal to the digital signal at a point before the receiver decision circuit in order to increase the measured BER. The measurements, taken at several values of reducing sinusoidal amplitude, are extrapolated to zero amplitude, thereby giving the system BER.

The sinusoidal signal can be injected into the receiver optically, by adding it to the optical data input. This method is usually the only procedure available for testing at the system or link level since access to the decision circuit is normally not available in operational equipment. To add the sinusoidal signal electrically requires electrical access to the decision circuitry of the receiver which would be more suitable for testing at the component or subsystem level.

Both methods should yield similar results since they rely on an extrapolation to the point where the impairment has been removed.

The optical method requires an a.c.-coupled receiver, while the electrical method is applicable to an a.c.- or d.c.-coupled receiver.

B.2 Apparatus

Common to all methods is the conventional error measurement equipment: a pattern generator and an error detector.

- a) A sinewave generator capable of producing a frequency within the passband of the system under test, and of generating stable output levels between 1 mV and 1 V, with at least 3 digits' amplitude resolution. A typical frequency synthesizer meets these requirements.
- b) An analogue laser transmitter, with adjustable cw output power, stable to 0,1 dB over 1 h, of a wavelength similar to the system under test and capable of being modulated at a frequency well within the passband of the receiver under test. This serves as an "interfering laser".
- c) An optical splitter/combiner with split ratios typically between 50:50 and 10:90, and with fibre compatible with that of the system and the interfering laser.
- d) An analogue optical receiver capable of detecting frequencies within the passband of the system under test, used to confirm proper operation of the interfering laser.

B.3 Sampling and specimens

The specimen is a fibre optic digital system consisting of a digital transmitter and a digital receiver. In between them is either a fibre link consisting of fibre or cable and possibly passive or active components (if an operational link is to be tested) or a variable optical attenuator (if the transmitter/receiver pair alone is to be tested).

B.4 Procedure

B.4.1 Optical sinusoidal interference method

Refer to Figure B.1.

- Place the combiner with one input port connected to either the fibre link or attenuator. Connect the output port to the receiver and the other input port to the interfering laser, which is modulated by the sinewave generator. Connect the receiver to the error detector.
- Adjust the transmitter and receiver to the desired operating conditions. Adjust the data pattern and (if the attenuator is used) the received power. The receiver input power level is to be held constant for the duration of the measurement procedure.
- Choose the frequency of the sinewave generator to be well within the passband of the receiver and not harmonically related to the bit-rate. It should be significantly different (such as 1 Mbit/s) from the bit-rate so that no slow beat phenomena are possible.
- Turn on the interfering laser and adjust its output level so that its power as seen at the output of the combiner is similar to the power seen there due to the laser transmitter of the data link under test. Apply modulation to the interfering laser and adjust the modulation depth until a BER value of approximately 10^{-4} is reached. (It is assumed that the BER is immeasurably low before the interfering signal is added.) Ensure that the interfering laser output is not distorted by monitoring it with the analogue optical receiver. It may be necessary to choose a combiner with a different coupling ratio or to adjust the signal level of the interfering laser in order to achieve the above.
- Decrease the modulation depth of the interfering laser a step at a time by adjusting the output level of the sinewave generator, and at each step record the BER value measured by the error detector.
- Measure at least 5 data pairs, with the BER values measured to 2 significant figures.

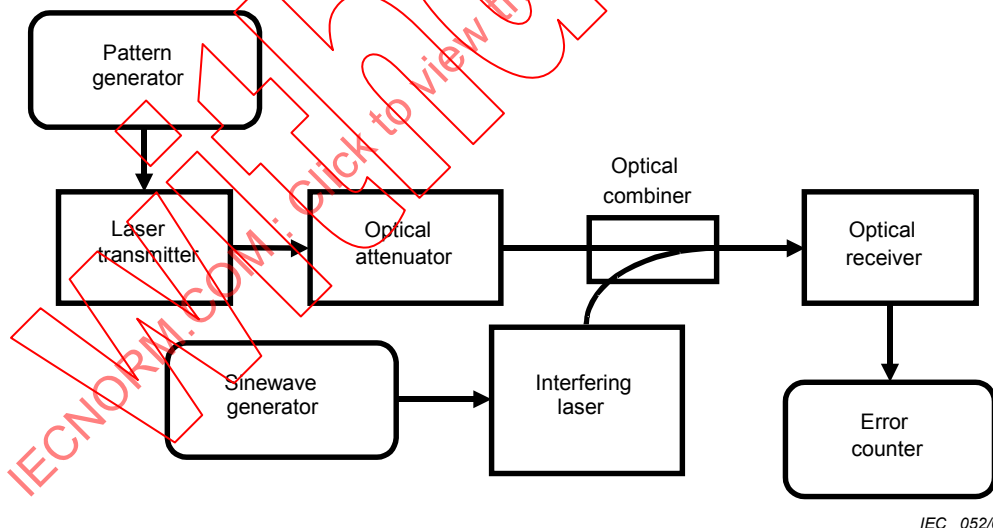


Figure B.1 – Set-up for the sinusoidal interference method by optical injection

The following is an example.

Table B.1 – Results for sinusoidal injection

Sinewave amplitude A (mV)	BER
100	$5,0 \times 10^{-5}$
95	$1,1 \times 10^{-5}$
90	$6,3 \times 10^{-6}$
85	$9,8 \times 10^{-7}$
80	$2,3 \times 10^{-7}$
75	$4,6 \times 10^{-8}$

In order to achieve a precision to two significant digits for the BER values, it is necessary to accumulate sufficient errors, approximately 100, to achieve consistency. The time taken to measure errors must, however, not compromise the stability of the amplitude of the interference signal, since small variations in the amplitude of the interfering signal can have a large effect on the subsequent extrapolation procedure.

B.4.2 Electrical sinusoidal interference method

Refer to Figure B.2.

- AC-couple the sinewave generator to the decision threshold input of the comparator in the receiver under test. If the comparator has differential data inputs, a large series resistor can be used to isolate the comparator data signal from the sinewave generator. If isolation is difficult to achieve, use the threshold modification method of Clause 2 of this document.
- Adjust the transmitter and receiver to the desired operating conditions. Adjust the data pattern and (if the attenuator is used) the received power to be constant for the duration of the measurement procedure.
- Choose the frequency of the sinewave generator to be well within the passband of the receiver and not harmonically related to the bit-rate. It should be significantly different (such as 1 Mbit/s) from the bit-rate so that no slow-beat phenomena are possible. The frequency should also be well above the range of any AGC or threshold-tracking loop in the receiver.
- Adjust the amplitude of the sinewave generator until a BER value of approximately 10^{-4} is reached.
- Decrease the amplitude of the interference one step at a time, by decreasing the output of the sinewave generator. At each step, record the BER using the error detector. The resulting data should be similar to those given in 3.4.1.

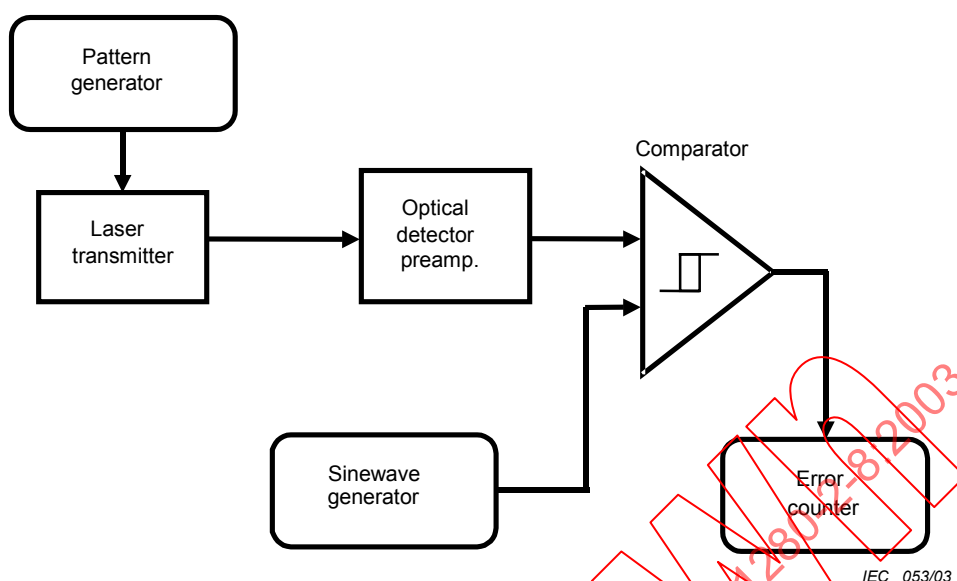


Figure B.2 – Set-up for the sinusoidal interference method by electrical injection

B.5 Calculations and interpretation of results

B.5.1 Mathematical analysis

These calculations apply for both the optical and electrical options of B.4.1 and B.4.2. Denote the data pairs as given in Table B.1 as (A_i, BER_i) . Transform the BER values using the function:

$$\Psi(BER_i) = \frac{-c_2 + \sqrt{c_2^2 - 4c_1(c_3 + x_i)}}{2c_1}$$

where

$$x_i = \ln(2 * BER_i)$$

$$c_1 = 0,4926, c_2 = 0,2948, c_3 = 0,7921$$

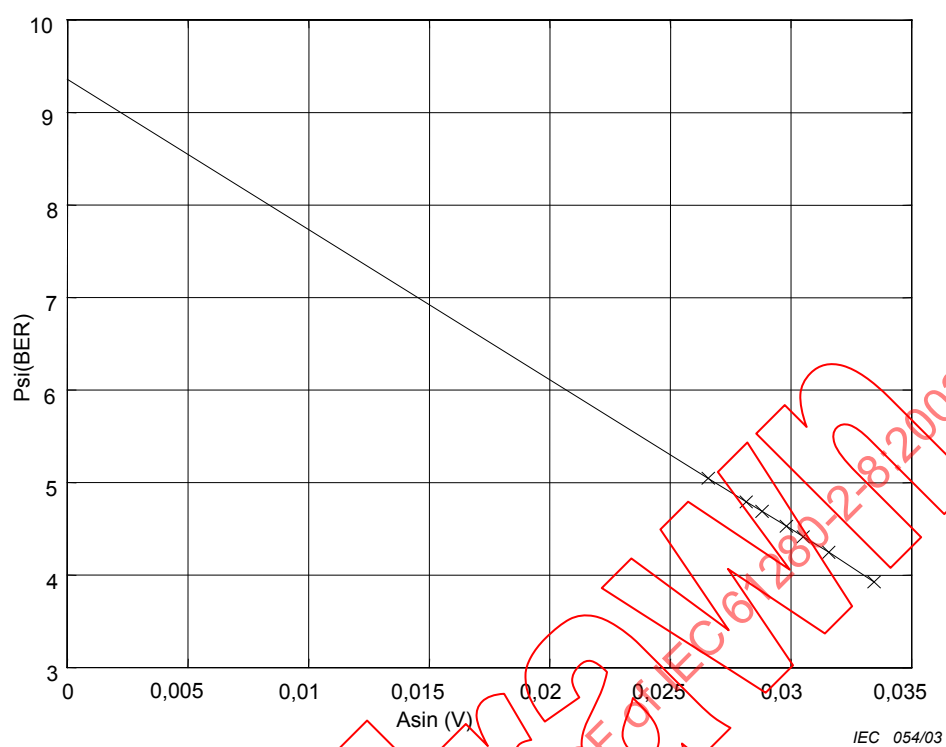
B.5.2 Extrapolation

Fit a straight line to the values $\Psi(BER_i)$ versus A_i . Extrapolate it to the ordinate where $A_0 = 0$, giving the value $\Psi(BER_0) = Q$. (The curve is not a very good fit for BER values greater than 10^{-4} because of the *erfc* approximation used in the equation. Therefore, data with BER values higher than 10^{-4} should not be used.)

Calculate the system BER as

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \cong \frac{1}{Q} e^{-Q^2/2} \cdot \frac{1 - Q^{-2} + 3Q^{-4}}{\sqrt{2\pi}}$$

This is the estimated value of BER at which the system under test is operating. The above approximation to *erfc*(•) is sufficiently accurate for all error rates of interest.



**Figure B.3 – BER Result from the sinusoidal interference method
(data points and extrapolated line)**

B.5.3 Expected results

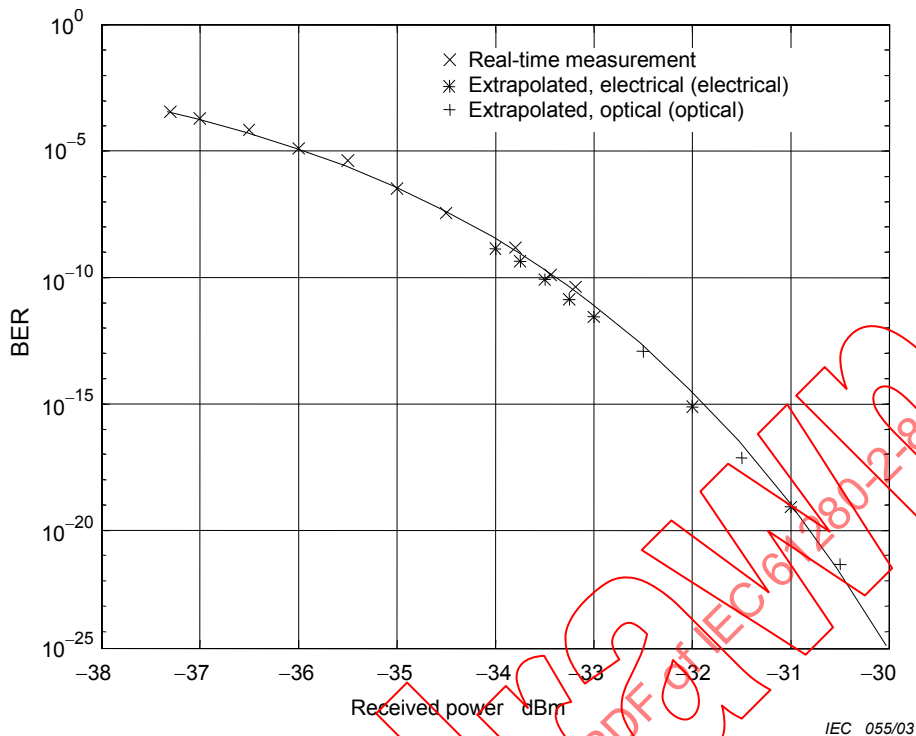


Figure B.4 – BER versus optical power for three methods

Figure B.4 is an example of the results to be expected using the above extrapolation techniques. The BER of a 50 Mbit/s, single-mode data link was measured by 3 techniques:

- conventional BER measurement down to 10^{-10}
- extrapolation using the optical interference method of B.4.1;
- extrapolation using the electrical interference method of B.4.2.

The solid line is an error function fit to the measured data using best estimates for the noise of the receiver, which is independent of received power and the noise from the transmitter, which is proportional to received power.

B.6 Documentation

The following information shall be reported with each test.

- a) Date of test
- b) This document number
- c) Specimen identification
- d) Type of transmitter
- e) Type of receiver

B.7 Specification information

The following details shall be specified.

- a) IEC number
- b) Any special test requirements
- c) Failure or acceptance criteria

Bibliography

- [1] TIA/EIA-526-4A: OFSTP-4: *Optical Eye Pattern Measurement Procedure*
- [2] TIA/EIA-526-8: OFSTP-8: *Accelerated Measurement of Low BER in Digital Fibre Optic Systems*
- [3] TIA/EIA-526-9: OFSTP-9: *Accelerated Measurement Procedure for Determining BER and Q-Factor in Optical Transmission Systems Using the Variable Threshold Method*
- [4] PALACHARLA, P. et al. *Techniques for Accelerated Measurement of Low Bit Error Rates in Computer Data Links*. International Conference on Computers and Communications, Phoenix, March 1995
- [5] BERGANO, NS., KERFOOT, FW. and DAVIDSON, CR. Margin Measurements in Optical Amplifier Systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, March 1993, Vol. 5, No. 3, p.304-306
- [6] HUMBLET, PA. and AZIZOGLU, M. On the bit error rate of lightwave systems with optical amplifiers. *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, 1991, vol. LT-9, p.1576-1582
- [7] HP E4543A: *Q Factor and Eye Contour Application Software*
- [8] BEVINGTON, Philip R. *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. McGraw Hill, 1969, p.92

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	34
1 Domaine d'application	36
2 Définitions et termes abrégés	36
2.1 Définitions	36
2.2 Abréviations	36
3 Mesure des faibles taux d'erreur binaire	37
3.1 Considérations générales	37
3.2 Informations sur le facteur Q	38
4 Méthode du seuil de décision variable	40
4.1 Présentation	40
4.2 Appareillage	43
4.3 Échantillonnage et spécimens	43
4.4 Procédure	43
4.5 Calculs et interprétation des résultats	45
4.6 Documentation des essais	49
4.7 Informations relatives à la spécification	49
5 Méthode du seuil optique variable	49
5.1 Présentation	49
5.2 Appareillage	50
5.3 Éléments en essai	50
5.4 Procédure pour liaison optique de base	50
5.5 Procédure pour système intégré	51
5.6 Évaluation des résultats	52
Annexe A (normative) Calcul de limite d'erreur sur la valeur de Q	54
Annexe B (informative) Méthode de brouillage sinusoïdale	56
Bibliographie	62
Figure 1 – Exemple de diagramme de l'œil montrant des effets de moirage	39
Figure 2 – Technique de mesure plus précise utilisant un oscilloscope d'échantillonnage numérique qui échantillonne les statistiques de bruit entre les centres des yeux	40
Figure 3 – Taux d'erreur binaire en fonction du niveau du seuil de décision	41
Figure 4 – Tracé du facteur Q en fonction de la tension de seuil	42
Figure 5 – Montage pour la méthode du seuil de décision variable	44
Figure 6 – Réglage du niveau du seuil initial (approximativement au centre de l'œil)	44
Figure 7 – Effet de la polarisation optique	50
Figure 8 – Montage pour liaison optique ou dispositif d'essai	51
Figure 9 – Montage pour l'essai du système	52
Figure 10 – Extrapolation de log TEB en fonction de la polarisation	53
Figure B.1 – Montage pour la méthode de brouillage sinusoïdal par injection optique	57
Figure B.2 – Montage pour la méthode de brouillage sinusoïdal par injection électrique	59

Figure B.3 – TEB obtenu par la méthode de brouillage sinusoïdal (points de données et ligne extrapolée) 60

Figure B.4 – TEB en fonction de la puissance optique pour trois méthodes 60

Tableau 1 – Temps moyen pour l'accumulation de 15 erreurs en fonction du TEB et du débit binaire 37

Tableau 2 – TEB en fonction de la tension de seuil 46

Tableau 3 – f_i en fonction de D_i 47

Tableau 4 – Valeurs des constantes de régression linéaire 48

Tableau 5 – Moyenne et écart type 48

Tableau 6 – Exemple d'essais de polarisation optique 52

Tableau B.1 – Résultats pour une injection sinusoïdale 58

Withdrawing
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 61280-2-8:2003

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

Partie 2-8: Détermination de faible Taux d'Erreur Binaire (TEB) en utilisant des mesures du facteur Q

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61280-2-8 a été établie par le sous-comité 86C: Systèmes et dispositifs actifs à fibres optiques, du comité d'études 86 de la CEI: Fibres optiques.

La présente version bilingue (2012-09) correspond à la version anglaise monolingue publiée en 2003-02.

Le texte anglais de cette norme est issu des documents 86C/485/FDIS et 86C/505/RVD.

Le rapport de vote 86C/505/RVD donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

La version française de cette norme n'a pas été soumise au vote.

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

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2010. A cette date, la publication sera

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

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

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

Partie 2-8: Détermination de faible Taux d'Erreur Binaire (TEB) en utilisant des mesures du facteur Q

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61280 spécifie deux méthodes principales de détermination de faibles valeurs de TEB en réalisant des mesures accélérées. Celles-ci incluent la méthode du seuil de décision variable (Article 4) et la méthode du seuil optique variable (Article 5). En outre, une troisième méthode, la méthode de brouillage sinusoïdal, est décrite à l'Annexe B.

2 Définitions et termes abrégés

2.1 Définitions

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

2.1.1

émission spontanée amplifiée

ASE (Amplified Spontaneous Emission)

dégradation générée dans les amplificateurs optiques

2.1.2

taux d'erreur binaire

TEB

nombre de bits erronés par rapport au nombre total de bits

2.1.3

brouillage intersymbole

ISI (InterSymbol Interference)

brouillage mutuel entre symboles dans un flux de données, généralement provoqué par des effets non linéaires et des limitations de largeur de bande de la voie de transmission

2.1.4

facteur Q

Q

rapport entre la différence entre la tension moyenne des rails 1 et 0 et la somme de leurs valeurs d'écart type

2.2 Abréviations

cw	Continuous Wave (onde entretenue). Elle se rapporte normalement à une forme d'onde sinusoïdale.
CC	Courant continu
DSO	Digital Sampling Oscilloscope (oscilloscope à échantillonnage)
DUT	Device Under Test (dispositif en essai)
PRBS	Pseudo-Random Binary Sequence (séquence binaire pseudo-aléatoire)

3 Mesure des faibles taux d'erreur binaire

3.1 Considérations générales

Les systèmes et les sous-systèmes de communication à fibres optiques sont capables d'offrir une excellente performance d'erreur, même à des débits binaires très élevés. Le taux d'erreur binaire moyen (TEB) peut typiquement se situer dans la région allant de 10^{-12} à 10^{-20} , selon la nature du système. Bien que ce type de performance soit bien supérieur aux exigences de performance pratique pour les signaux numériques, il présente l'avantage d'enchaîner de nombreuses liaisons sur de longues distances sans recourir à des techniques de correction d'erreurs.

La mesure de tels faibles taux d'erreur entraîne des problèmes particuliers sur le temps nécessaire pour mesurer un nombre suffisamment grand d'erreurs pour obtenir un résultat statistiquement significatif. Le Tableau 1 présente le temps moyen nécessaire pour accumuler 15 erreurs. Ce nombre d'erreurs peut être considéré comme statistiquement significatif, offrant un niveau de confiance de 75 % avec une variabilité de 50 %.

Tableau 1 – Temps moyen pour l'accumulation de 15 erreurs en fonction du TEB et du débit binaire

TEB Bits/s	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}	10^{-13}	10^{-14}	10^{-15}
1,0M	1,5 s	15 s	2,5 min	25 min	4,2 h	1,7 d	17 d	170 d	4,7 années	47 années
2,0M	750 ms	7,5 s	75 s	750 s	2,1 h	21 h	8,8 d	88 d	2,4 années	24 années
10M	150 ms	1,5 s	15 s	2,5 min	25 min	4,2 h	1,7 d	17 d	170 d	4,7 années
50M	30 ms	300 ms	3,0 s	30 s	5,0 min	50 min	8,3 h	3,5 d	35 d	350 d
100M	15 ms	150 ms	1,5 s	15 s	2,5 min	25 min	4,2 h	1,7 d	17 d	170 d
500M	3 ms	30 ms	300 ms	3,0 s	30 s	5,0 min	50 min	8,3 h	3,5 d	35 d
1,0G	1,5 ms	15 ms	150 ms	1,5 s	15 s	2,5 min	25 min	4,2 h	1,7 d	17 d
10G	150 μ s	1,5 ms	15 ms	150 ms	1,5 s	15 s	2,5 min	25 min	4,2 h	1,7 d
40G	38 μ s	380 μ s	3,8 ms	38 ms	380 ms	3,8 s	38 s	6,3 min	63 min	10,4 h
100G	15 μ s	150 μ s	1,5 ms	15 ms	150 ms	1,5 s	15 s	2,5 min	25 min	4,2 h

Les temps présentés dans le Tableau 1 montrent que la mesure directe des faibles valeurs de TEB attendues pour des systèmes à fibres optiques n'est pas pratique pendant les opérations d'installation et de maintenance. Une manière de surmonter cette difficulté consiste à dégrader artificiellement le rapport signal/bruit au niveau du récepteur de façon contrôlée, pour augmenter ainsi de manière significative le TEB et réduire le temps de mesure. La performance d'erreur est mesurée pour différents niveaux de dégradation, et les résultats sont alors extrapolés à un niveau de dégradation nulle en utilisant des méthodes informatiques ou graphiques reposant sur des algorithmes de régression théoriques ou empiriques.

La difficulté engendrée par l'utilisation d'une technique de régression pour déterminer la performance d'erreur est que la valeur théorique du TEB est liée au niveau de dégradation par la fonction d'erreur inverse (*erfc*). Ceci signifie que de très petites variations des dégradations entraînent de très grandes variations du TEB. Par exemple, dans la région d'une valeur de TEB de 10^{-15} , une variation d'environ 1 dB du niveau de dégradation entraîne une variation de trois ordres d'amplitude du TEB. Une autre difficulté est qu'une méthode basée sur une extrapolation est peu susceptible de montrer une stabilisation du TEB seulement à environ 3 ordres d'amplitude au-dessous de la plus basse valeur mesurée.

Il convient également de noter que, dans le cas de sections régénérées par voie numérique, les résultats obtenus s'appliquent seulement à la section régénérée dont le récepteur est en essai. Les erreurs produites dans des sections régénérées en amont peuvent produire un plateau d'erreur qui peut devoir être pris en compte pour évaluer la performance d'erreur de la section du régénérateur en essai.

Comme cela est indiqué ci-dessus, deux méthodes principales de détermination de faibles valeurs de TEB en procédant à des mesures accélérées sont décrites. Il s'agit de la méthode du seuil de décision variable (Article 4) et de la méthode du seuil optique variable (Article 5). En outre, une troisième méthode, la méthode de brouillage sinusoïdal, est décrite à l'Annexe B.

Il convient de noter que ces méthodes sont applicables à la détermination de la performance d'erreur en ce qui concerne les dégradations basées sur l'amplitude. La gigue peut également affecter la performance d'erreur d'un système, et son effet nécessite d'autres méthodes de détermination. Si la performance d'erreur est dominée par des dégradations de la gigue, les méthodes basées sur l'amplitude décrites dans la présente norme donneront des valeurs de TEB inférieures à la valeur réelle.

La méthode du seuil de décision variable est la procédure qui donne la mesure la plus exacte du facteur Q et du TEB pour des systèmes optiques dont les statistiques de bruit sont inconnues ou imprévisibles. Toutefois, une limitation sur l'utilisation de la méthode du seuil variable pour mesurer le facteur Q et le TEB est la nécessité d'avoir accès aux circuits électroniques des récepteurs afin de manipuler le seuil de décision. Pour les systèmes dans lesquels un tel accès n'est pas possible, il peut être utile d'utiliser, en variante, la méthode du seuil optique variable. Pour les deux méthodes, il est possible d'automatiser la mesure et le calcul des résultats.

3.2 Informations sur le facteur Q

Le facteur Q est le rapport signal/bruit (S/B) au niveau du circuit de décision. Il est typiquement exprimé sous la forme suivante [3]:¹

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (1)$$

où μ_1 et μ_0 sont les niveaux de tension moyens des rails "1" et "0", respectivement, et σ_1 et σ_0 sont les valeurs d'écart type de la distribution de bruit sur les rails "1" et "0", respectivement.

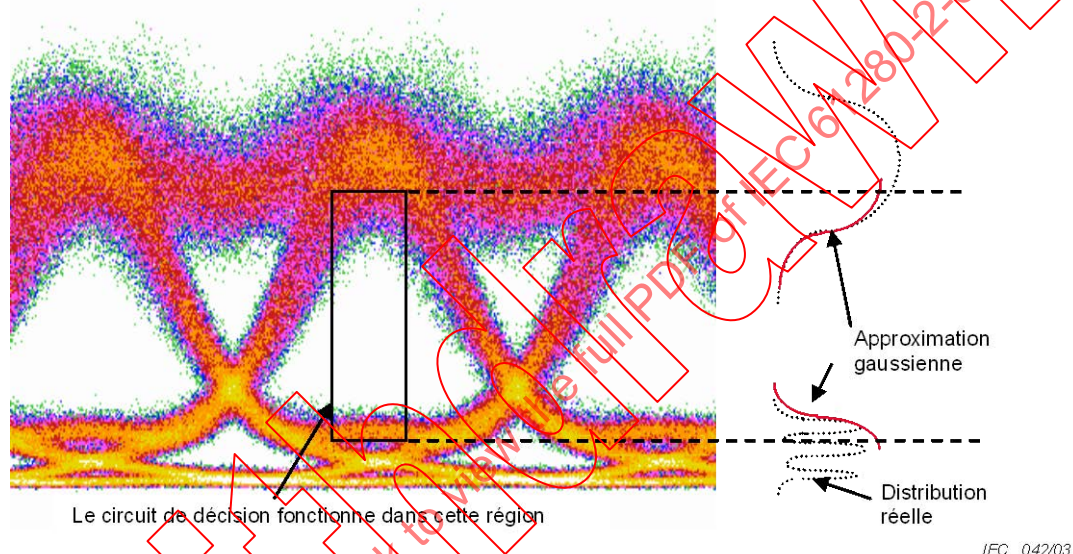
Une estimation précise de la performance de transmission d'un système, ou le facteur Q, doit tenir compte des effets de toutes les sources de dégradation de performance, dégradation fondamentale et dégradation due aux imperfections réelles. Deux sources importantes sont le bruit de l'émission spontanée amplifiée (ASE) et le brouillage intersymbole (ISI). Les autres bruits sont générés par l'émission spontanée amplifiée des amplificateurs optiques. Le brouillage intersymbole résulte de nombreux effets, tels que la dispersion chromatique, les non-linéarités des fibres, brouillage à trajets multiples, la dispersion de mode de polarisation et l'utilisation de circuits électroniques de bande passante finie. On rencontre également d'autres effets, par exemple une mauvaise adaptation d'impédance peut causer des dégradations telles que de longs temps de descente ou une forme d'onde amortie.

Une méthode possible pour mesurer le facteur Q est la méthode de l'histogramme de tension dans laquelle un oscilloscope d'échantillonnage numérique est utilisé pour mesurer des histogrammes de tension au centre d'un œil binaire pour estimer le facteur Q de la forme d'onde [4]. Dans cette méthode, un générateur de motifs est utilisé comme stimulus et l'oscilloscope est utilisé pour mesurer l'ouverture de l'œil reçue et l'écart type du bruit présent dans les deux rails de tension. Comme approximation grossière, le bord de visibilité du bruit représente les points 3σ d'une distribution supposée gaussienne. L'avantage d'utiliser un oscilloscope pour mesurer l'œil est sa rapidité sur un trafic réel avec un minimum de matériel.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie.

La méthode de l'oscilloscope pour mesurer le facteur Q présente plusieurs inconvénients. Lorsqu'il est utilisé pour mesurer l'œil de données à grande vitesse (de l'ordre de plusieurs Gbit/s), la vitesse d'échantillonnage numérique limitée de l'oscilloscope (souvent de l'ordre de quelques centaines de kHz) permet seulement d'utiliser une petite partie du flux de données à grande vitesse pour mesurer le facteur Q . Des temps d'observation plus longs peuvent réduire l'impact de l'échantillonnage lent. Un autre inconvénient, plus important, est que les estimations de Q dérivées des histogrammes de tension au centre de l'œil sont souvent imprécises. Les différents effets de moirage et le bruit ajouté généré par les circuits électroniques frontaux de l'oscilloscope peuvent souvent masquer la variance réelle du bruit.

La Figure 1 est un exemple de diagramme de l'œil sur un système en fonctionnement. On peut voir sur cette figure que les histogrammes verticaux traversant le centre de l'œil montrent des effets de moirage (on remarque moins le bruit généré par les circuits électroniques frontaux de l'oscilloscope). Il est difficile de prévoir la relation entre le facteur Q mesuré de cette façon et le TEB réel mesuré avec un montage d'essai.



NOTE Les données pour mesurer le facteur Q sont obtenues à partir de la queue des distributions gaussiennes.

Figure 1 – Exemple de diagramme de l'œil montrant des effets de moirage

La Figure 2 montre une autre manière possible de mesurer le facteur Q en utilisant un oscilloscope. L'idée est d'utiliser le centre de l'œil pour estimer l'ouverture de l'œil et utiliser la zone entre les centres des yeux pour estimer le bruit. Les contributions de l'effet du motif sur la largeur de l'histogramme seraient alors réduites. Un inconvénient de cette méthode est qu'elle est basée sur des mesures faites sur une partie de l'œil que le récepteur n'utilise jamais réellement.

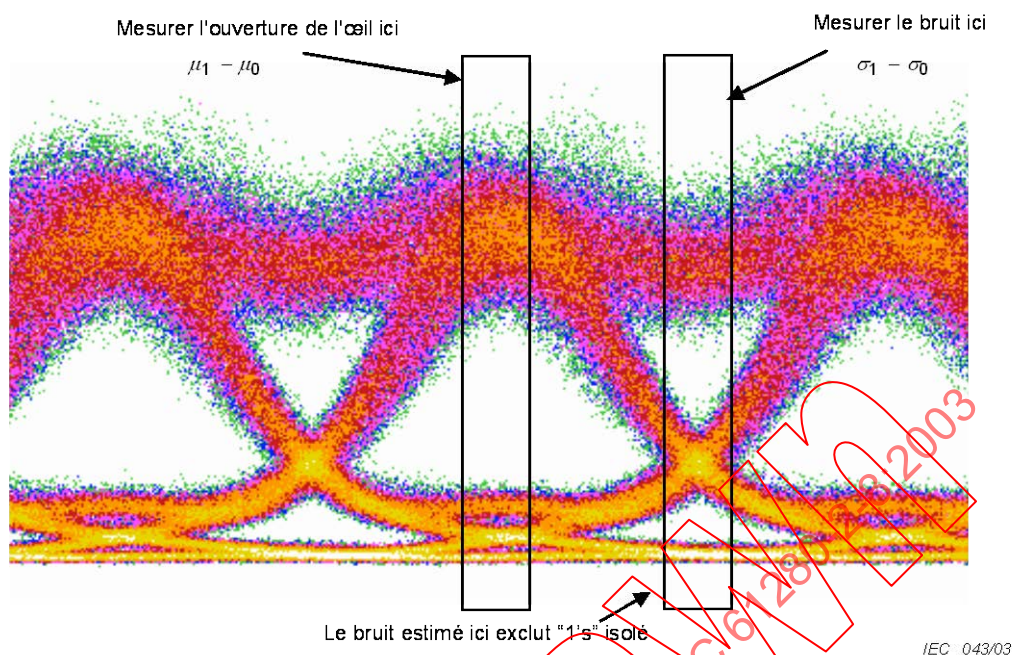


Figure 2 – Technique de mesure plus précise utilisant un oscilloscope d'échantillonnage numérique qui échantillonne les statistiques de bruit entre les centres des yeux

Il est tentant de conclure que les estimations pour σ_1 et σ_0 tendent à être surestimées et que les mesures résultantes de Q forment toujours une limite inférieure au Q réel pour l'une ou l'autre de ces méthodes basées sur un oscilloscope. Ce n'est pas forcément le cas. Il est possible que les distributions de l'histogramme soient déformées d'autres manières. Par exemple elles peuvent être asymétriques de telle sorte que les valeurs moyennes surestiment l'ouverture de l'œil et le Q résultant ne sera plus une limite inférieure. Malheureusement, il n'existe pas de relation caractérisée facilement entre les mesures de Q dérivé d'un oscilloscope et la performance d'un TEB.

4 Méthode du seuil de décision variable

4.1 Présentation

Cette méthode d'estimation du facteur Q est basée sur l'utilisation d'un récepteur frontal avec un seuil de décision variable. Des moyens de mesure du TEB du système sont nécessaires. Typiquement, la mesure est effectuée avec un montage d'essai d'erreur utilisant une séquence binaire pseudo-aléatoire (PRBS), mais il existe des techniques alternatives qui permettent un fonctionnement avec du trafic. La mesure est basée sur le fait que pour un œil de données avec des statistiques gaussiennes, le TEB peut être calculé de manière analytique comme suit:

$$TEB(V_{th}) = \frac{1}{2} \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{|V_{th} - \mu_1|}{\sigma_1} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{|V_{th} - \mu_0|}{\sigma_0} \right) \right) \quad (2)$$

où

μ_1, μ_0 et σ_1, σ_0 sont la moyenne et l'écart type des rails de données "1" et "0";

V_{th} est le niveau du seuil de décision;

$\operatorname{erfc}(\cdot)$ est la fonction d'erreur complémentaire donnée par

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\beta^2/2} d\beta \cong \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} \quad (3)$$

(L'approximation est presque exacte pour $x > 3$.)

Le TEB, donné dans l'équation 2, est la somme de deux termes. Le premier terme est la probabilité conditionnelle de décider qu'un "0" a été reçu quand un "1" a été envoyé, et le deuxième terme est la probabilité de décider qu'un "1" a été reçu quand un "0" a été envoyé.

Pour mettre en œuvre cette technique, le TEB est mesuré en fonction de la tension de seuil (voir Figure 3). L'équation 2 est alors utilisée pour convertir les données en un tracé du facteur Q en fonction du seuil, où le facteur Q est l'argument de la fonction d'erreur complémentaire d'un des termes de l'équation 2. Pour faire la conversion, on considère l'approximation selon laquelle le TEB est dominé par un seul des termes dans l'équation 2 selon que le seuil est plus près du rail de "1" ou du rail de "0" du diagramme de l'œil.

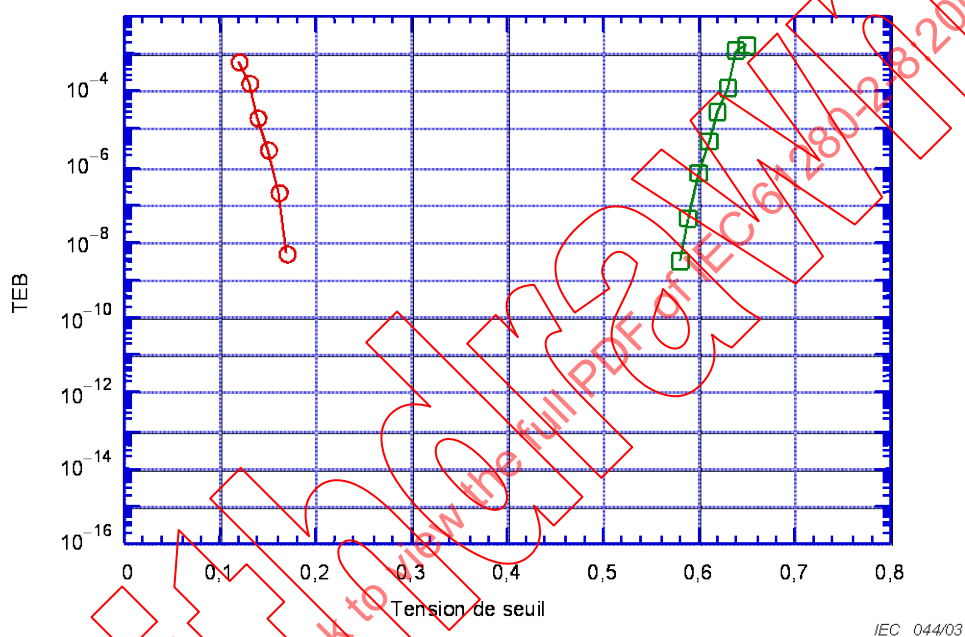


Figure 3 – Taux d'erreur binaire en fonction du niveau du seuil de décision

La Figure 4 montre les résultats de la conversion des données dans la Figure 3 en un tracé du facteur Q en fonction du seuil. La valeur optimale du facteur Q ainsi que le réglage du seuil optimal nécessaire pour atteindre ce facteur Q sont obtenus à partir de l'intersection des droites de meilleur ajustement des données. Cette technique est décrite en détail en [2].

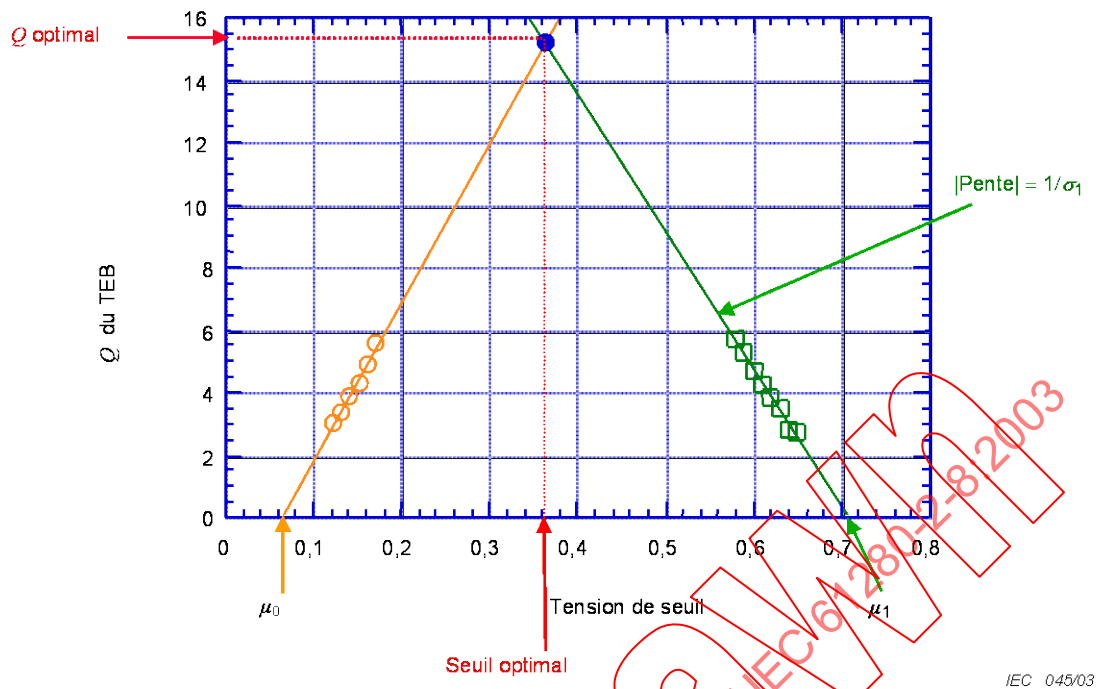


Figure 4 – Tracé du facteur Q en fonction de la tension de seuil

Le seuil optimal ainsi que le Q optimal peuvent être obtenus de manière analytique en utilisant l'approximation suivante [1] pour la fonction d'erreur inverse:

$$\left[\log \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(x) \right\} \right]^{-1} \approx 1,192 - 0,6681x - 0,0162x^2 \quad (4)$$

où x est le $\log(\text{TEB})$.

NOTE L'équation (4) est précise à $\pm 0,2$ % sur la gamme de TEB allant de 10^{-5} à 10^{-10} .

Après l'évaluation de la fonction d'erreur inverse, les données sont tracées en fonction du niveau du seuil de décision, V_{th} . Comme le montre la Figure 4, une ligne droite est ajustée à chaque ensemble de données par régression linéaire. La variance et la moyenne équivalentes pour le calcul de Q sont données par la pente et la coordonnée à l'origine respectivement.

Le TEB minimal peut être représenté pour se produire à un seuil optimal, $V_{th-optimal}$, quand les deux termes dans l'argument de l'équation 2 sont égaux, c'est-à-dire

$$\frac{(\mu_1 - V_{th-optimal})}{\sigma_1} = \frac{(V_{th-optimal} - \mu_0)}{\sigma_0} = Q_{opt} \quad (5)$$

Une expression explicite pour $V_{th-optimal}$ en termes de $\mu_{1,0}$ et $\sigma_{1,0}$ peut être dérivée de l'équation (5) pour être:

$$V_{th-optimal} = \frac{\sigma_0 \mu_1 + \sigma_1 \mu_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad (6)$$

La valeur de Q_{opt} est obtenue à partir de l'équation 1. Le TEB résiduel au seuil optimal peut être obtenu à partir de l'équation 2 et est approximativement

$$TEB_{\text{optimal}} \cong \frac{e^{-(Q_{\text{opt}}^2/2)}}{Q_{\text{opt}} \sqrt{2\pi}} \quad (7)$$

NOTE Cette approximation est presque exacte pour $Q_{\text{opt}} > 3$.

Il convient de noter que même si la méthode du seuil variable utilise des statistiques gaussiennes, elle donne des résultats précis pour les systèmes dont les statistiques de bruit ne sont pas gaussiennes, ainsi que, par exemple, pour les statistiques non gaussiennes qui se produisent dans un système à amplification optique typique [4]. La Figure 1 explique ces résultats. Le circuit de décision d'un récepteur fonctionne seulement sur la région intérieure de l'œil. Ceci signifie que la seule partie de l'histogramme vertical qu'il utilise est la "queue" qui s'étend dans l'œil. La méthode du seuil de décision de variable revient à construire une approximation gaussienne au niveau de la queue de la distribution réelle dans la région du centre de l'œil où elle affecte directement le fonctionnement du récepteur. Comme le montre l'exemple de la Figure 1, cette approximation gaussienne ne reproduira pas du tout la distribution réelle de l'histogramme, ce qui n'est pas utile dans le cadre de l'estimation de Q .

Une autre manière de regarder la technique du seuil de décision variable est d'imaginer remplacer le vrai œil de données par un œil factice ayant des statistiques gaussiennes. Les deux diagrammes de l'œil ont le même TEB en fonction du comportement de la tension de seuil de décision. Il est donc raisonnable de leur attribuer la même valeur de Q équivalente, même si les détails du diagramme de l'œil entier peuvent être très différents. Naturellement, il est nécessaire de garder à l'esprit que cette analyse ne fonctionnera pas pour des systèmes dominés par des sources de bruit dont les "queues" ne sont pas facilement approximées comme étant de forme gaussienne; ce qui se produirait, par exemple, dans un système dominé par de la diaphonie ou un bruit modal. En prenant ces mesures, l'impossibilité d'ajuster les données du facteur Q en fonction du seuil sur une ligne droite donnerait une bonne indication de la présence de telles sources de bruit.

On a constaté de manière expérimentale que les valeurs de Q mesurées en utilisant la méthode du seuil de décision variable ont un niveau statistiquement valide de corrélation avec les mesures de TEB réelles.

4.2 Appareillage

Un analyseur de performance d'erreur constitué d'un générateur de motifs et d'un détecteur de taux d'erreur binaire.

4.3 Échantillonnage et spécimens

Le dispositif en essai (DUT) est un système numérique à fibres optiques, constitué d'un émetteur électro-optique à une extrémité et d'un récepteur optoélectronique à l'autre extrémité. On peut placer entre l'émetteur et le récepteur un réseau optique avec des liaisons par fibres optiques (par exemple, un réseau DWDM).

4.4 Procédure

Les données pour la mesure de Q sont collectées dans la région supérieure "1" et dans la région inférieure "0" de l'œil comme le TEB (sur la gamme allant de 10^{-5} à 10^{-10}) en fonction du seuil de décision. La moyenne (μ) et la variance (σ) équivalentes de 1 et 0 sont déterminées en ajustant ces données sur une caractéristique gaussienne.

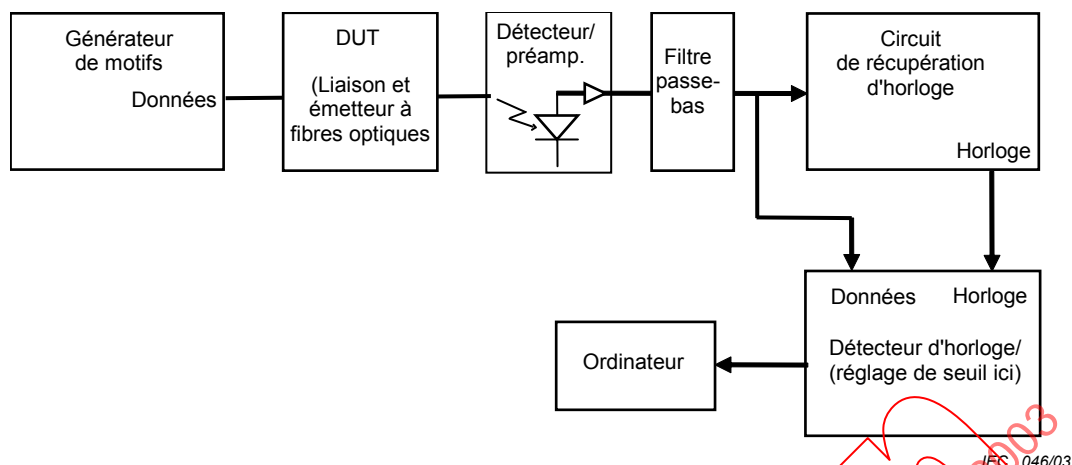


Figure 5 – Montage pour la méthode du seuil de décision variable

Le facteur Q est alors calculé en utilisant l'équation 1.

- Connecter le générateur de motifs et le détecteur d'erreur au système en essai conformément à la Figure 5.
- Régler la source d'horloge à la fréquence désirée.
- Régler la sortie, la polarité, le décalage et l'amplitude des motifs, des données et de l'horloge du générateur de motifs, selon les besoins.
- Régler la sortie et la polarité des motifs et des données du détecteur d'erreur, selon les besoins.
- Régler le retard d'entrée des données et de la tension du seuil de décision pour atteindre un point d'échantillonnage qui est approximativement au centre de l'œil de données comme cela est représenté à la Figure 6. C'est le point d'échantillonnage initial.

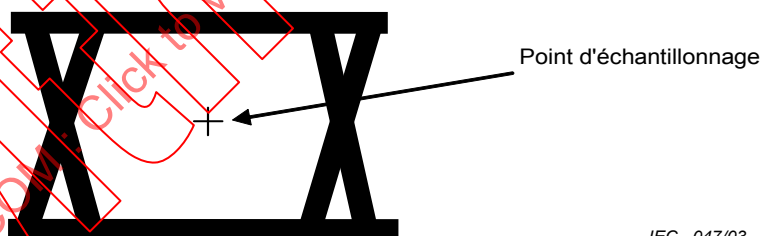


Figure 6 – Réglage du niveau du seuil initial (approximativement au centre de l'œil)

- Activer la fonction de déclenchement du détecteur d'erreur et le régler pour déclencher par erreurs, pour un minimum de 10, 100 ou 1 000 erreurs.
- Ajuster la tension du seuil de décision du détecteur d'erreur dans une direction positive jusqu'à ce que le TEB mesuré augmente jusqu'à une valeur supérieure à 10^{-10} . Noter la tension du seuil de décision (V_{b1}) et le TEB.
- Augmenter la tension du seuil de décision jusqu'à ce que le TEB soit supérieur à 10^{-5} et noter la tension du seuil de décision (V_{a1}) et le TEB.
- Noter la différence entre les deux valeurs de seuil V_{a1} et V_{b1} et choisir une taille de pas (V_{step1}) qui donne un nombre raisonnable (supérieur à 5) de points de mesure entre ces deux extrémités de seuil de décision. A partir de la valeur de seuil V_{a1} , diminuer la valeur de seuil de la taille du pas, V_{step1} . A chaque pas, effectuer une mesure de déclenchement sur le détecteur d'erreur. Enregistrer la valeur de TEB mesurée et la tension du seuil de décision correspondante.
- La mesure de déclenchement du détecteur d'erreur accumule des données et des informations d'erreur jusqu'à ce que le nombre minimal d'erreurs (comme spécifié en 5.5) ait été enregistré. Le fait de sélectionner un plus grand nombre minimal d'erreurs donne un

TEB statistiquement plus précis, au risque de nuire au temps de mesure, en particulier lors de la mesure de faibles valeurs de TEB. Pour un résultat statistiquement significatif, il convient que le nombre d'erreurs comptées ne soit pas inférieur à 15.

- k) Continuer jusqu'à ce que le TEB mesuré soit inférieur à 10^{-10} . Cet ensemble de tensions de seuil de décision en fonction du TEB est l'ensemble de données "1".
- l) Ajuster la tension de seuil de décision pour qu'elle reprenne sa valeur de point d'échantillonnage initial, puis continuer dans le sens négatif jusqu'à ce que le TEB augmente encore jusqu'à dépasser 10^{-10} . Noter la valeur de seuil (V_{b0}) et le TEB.
- m) Diminuer la tension du seuil de décision jusqu'à ce que le TEB soit supérieur à 10^{-5} et noter la tension du seuil de décision (V_{a0}) et le TEB.
- n) Noter la différence entre les deux valeurs de seuil V_{a0} et V_{b0} et choisir une taille de pas (V_{step0}) qui donne un nombre raisonnable (supérieur à 5) de points de mesure entre ces deux extrémités de seuil de décision. À partir de la valeur de seuil V_{a0} , augmenter la valeur de seuil de la taille du pas, V_{step0} . A chaque pas, effectuer une mesure de déclenchement sur le détecteur d'erreur. Enregistrer le TEB mesuré et la tension du seuil de décision correspondante.
- o) Continuer jusqu'à ce que le TEB mesuré soit inférieur à 10^{-10} . Cet ensemble de tensions de seuil de décision en fonction du TEB est l'ensemble de données "0".

4.5 Calculs et interprétation des résultats

4.5.1 Ensembles de données

La procédure de 4.7 fournit deux ensembles (pour les rails "0" et "1") de données sous la forme:

$$\begin{bmatrix} D_1, TEB_1 \\ D_2, TEB_2 \\ \vdots \\ D_n, TEB_n \end{bmatrix}$$

où

D_i est la tension du seuil de décision pour la " i "ème lecture ($i = 1, 2, \dots, n$);

TEB_i est le taux d'erreur binaire " i "ème lecture ($i = 1, 2, \dots, n$);

n est le nombre total de paires de données.

NOTE Il n'est pas nécessaire que le nombre total de paires de données pour les rails "0" et "1" soit égal.

A titre d'exemple, la tension et les valeurs de TEB suivantes ont été obtenues par une expérience pratique.

Tableau 2 – TEB en fonction de la tension de seuil

Rail "1"		Rail "0"	
Tension de seuil V	TEB	Tension de seuil V	TEB
–1,75	5,18E-05	–4,37	8,76E-05
–1,80	2,09E-05	–4,34	1,90E-05
–1,85	7,33E-06	–4,31	5,18E-06
–1,90	2,77E-06	–4,28	1,06E-06
–1,95	9,61E-07	–4,25	2,12E-07
–2,00	1,96E-07	–4,22	3,45E-08
–2,05	6,30E-08	–4,19	3,52E-09
–2,10	1,95E-08	–4,16	2,77E-10
–2,15	3,45E-09		
–2,20	1,39E-09		

4.5.2 Conversion du TEB en utilisant une fonction d'erreur inverse

Chaque valeur de TEB est alors convertie par une fonction d'erreur inverse, en utilisant l'approximation suivante donnée dans l'équation 4.

$$f_i = \left[\log \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(x_i) \right\} \right]^{-1} = 1,192 - 0,6681\{x_i\} - 0,0162\{x_i\}^2 \quad (8)$$

où $x_i = \log_{10} (\text{TEB}_i)$.

Ceci produira deux ensembles de données (pour "0" et "1") sous la forme:

$$\begin{bmatrix} D_1, f_1 \\ D_2, f_2 \\ \vdots \\ D_n, f_n \end{bmatrix}$$

Il convient que ces ensembles forment approximativement une ligne droite.

En utilisant les valeurs données dans le Tableau 2, on obtient les ensembles de données suivants.

Tableau 3 – f_i en fonction de D_i

Rail "1"		Rail "0"	
D_i (volts)	f_i	D_i (volts)	f_i
-1,75	3,7578	-4,37	3,6360
-1,80	3,9638	-4,34	3,9847
-1,85	4,1956	-4,31	4,2706
-1,90	4,4043	-4,28	4,6052
-1,95	4,6257	-4,25	4,9293
-2,00	4,9449	-4,22	5,2757
-2,05	5,1629	-4,19	5,6823
-2,10	5,3799	-4,16	6,0975
-2,15	5,6858		
-2,20	5,8390		

4.5.3 Régression linéaire

En utilisant les données ci-dessus, une technique de régression linéaire est utilisée pour ajuster, alternativement, chaque ensemble de données sur une ligne droite avec une équation de la forme:

$$Y = A + BX$$

où

$Y = \text{erfc}(TEB)$ (fonction d'erreur inverse de TEB)

$X = D$ (tension de seuil de décision)

Avec n points de données par ensemble, pour les ensembles de données supérieur ("1") et inférieur ("0"), il convient d'effectuer les calculs suivants [6]:

$$B = \frac{\sum XY - \frac{(\sum X)(\sum Y)}{n}}{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n}} \quad R^2 = \frac{\left(\sum XY - \frac{(\sum X)(\sum Y)}{n} \right)^2}{\left(\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n} \right) \left(\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n} \right)}$$

$$A = \frac{\sum Y}{n} - B \frac{\sum X}{n}$$

où

R^2 est le coefficient de détermination (une mesure indiquant la correspondance entre les données et une ligne droite);

$\sum$ est la somme des valeurs de 1 à n .

En utilisant les valeurs données dans le Tableau 3, on obtient:

Tableau 4 – Valeurs des constantes de régression linéaire

Rail "1"			Rail "0"		
A	B	R	A	B	R
-4,6125	-4,7638	0,9989	53,989	11,5307	0,9984

4.5.4 Moyenne et écart type

$$\sigma = \left| -\frac{1}{B} \right| \quad (\text{écart type de la région de bruit "1" ou "0"},$$

$$\mu = \frac{-A}{B} \quad (\text{moyenne de la région de bruit '1' ou '0'}).$$

Calculer μ_1, σ_1 à partir de l'ensemble de données "1" et μ_0, σ_0 à partir de l'ensemble de données "0".

En utilisant l'exemple du Tableau 4, on obtient:

Tableau 5 – Moyenne et écart type

Rail "1"		Rail "0"	
μ_1	σ_1	μ_0	σ_0
-0,9682	0,2099	-4,6822	0,9867249

4.5.5 Seuil de décision optimal

$$Q_{\text{opt}} = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

Donc, le seuil de décision optimal = $\frac{\sigma_0 \mu_1 + \sigma_1 \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$

Pour l'exemple donné précédemment, en utilisant la valeur dérivée pour Q_{opt} de 12,52, le seuil de décision optimal est -3,596 volts.

4.5.6 Seuil de décision optimal du TEB

En outre, le TEB résiduel prévu au seuil de décision optimal est donné par

$$\text{TEB} = \frac{e^{-\left(\frac{Q^2}{2}\right)}}{Q_{\text{opt}} \sqrt{2\pi}}$$

En supposant la valeur de 12,52 pour Q_{opt} dans notre exemple, le TEB résiduel est calculé pour être inférieur à 1×10^{-18} .

4.5.7 Seuil de décision non optimal du TEB

La valeur de TEB à des tensions de seuil de décision différentes de la tension optimale peut être calculée à partir de la formule suivante:

$$\text{TEB}(D) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{e^{-\frac{\left(\frac{|\mu_1 - D|}{\sigma_1}\right)^2}}}{\left(\frac{|\mu_1 - D|}{\sigma_1}\right)\sqrt{2\pi}} + \frac{e^{-\frac{\left(\frac{|\mu_0 - D|}{\sigma_0}\right)^2}}}{\left(\frac{|\mu_0 - D|}{\sigma_0}\right)\sqrt{2\pi}} \right\}$$

4.5.8 Limite d'erreur

En utilisant la formule de l'Annexe A (équation A.5), on peut dériver la limite d'erreur sur la valeur dérivée de Q optimal.

Pour l'exemple représenté, la limite d'erreur absolue sur Q est $\pm 0,5$.

4.6 Documentation des essais

Pour chaque essai, rapporter les informations suivantes.

- La date de l'essai
- Le numéro du document
- L'identification du spécimen/échantillon (c'est-à-dire, système de transmission optique en essai)
- Deux ensembles de données; un au-dessus du seuil optimal et l'autre en-dessous
- Il convient que chaque ensemble de données contienne au moins 5 lectures de seuil en fonction du TEB (pour des valeurs de TEB variant entre 10^{-5} et 10^{-10})
- Rapporter Q optimal ainsi que le seuil de décision optimal
- Rapporter la gamme d'erreur possible en valeur de Q

4.7 Informations relatives à la spécification

Les détails suivants doivent être spécifiés.

- Le numéro du document CEI
- Toutes les exigences d'essai spéciales
- Les critères de rejet ou d'acceptation

5 Méthode du seuil optique variable

5.1 Présentation

Cette méthode consiste à ajouter de manière optique une lumière de polarisation de brouillage prééglée au signal optique reçu afin d'augmenter le TEB mesuré. Les mesures prises à plusieurs valeurs de lumière de polarisation sont extrapolées à une polarisation nulle, pour évaluer la valeur de TEB en fonctionnement normal. Cette méthode s'applique uniquement aux récepteurs couplés à courant continu. L'effet d'ajouter une polarisation prééglée est représenté à la Figure 7.

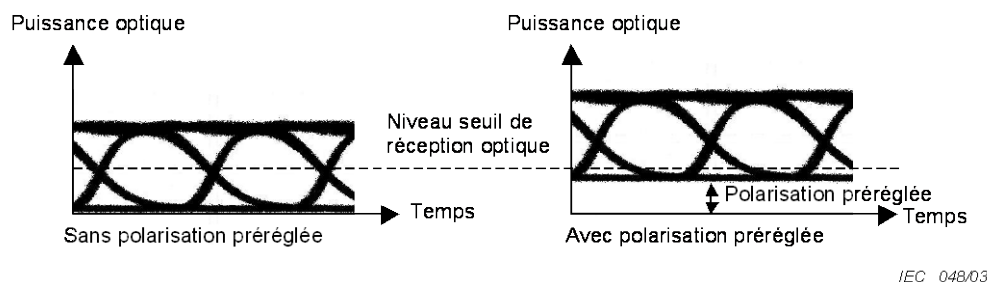


Figure 7 – Effet de la polarisation optique

La méthode peut être utilisée pour évaluer la performance d'erreur d'une liaison optique ou d'un dispositif actif comme cela est représenté à la Figure 1. En variante, la performance d'erreur d'un système complet peut être évaluée en utilisant le montage représenté à la Figure 2. L'avantage de cette méthode est qu'aucun accès interne au matériel n'est requis et que n'importe quel équipement de surveillance d'erreur interne du système en essai peut être utilisé. Si aucun tel équipement n'est disponible, un matériel traditionnel de mesure d'erreur peut être connecté aux bornes d'entrée et de sortie de données du système.

5.2 Appareillage

Un générateur de motifs et un détecteur d'erreur constituent un matériel traditionnel de mesure d'erreur commun à toutes les méthodes.

- Un matériel traditionnel d'essai de mesure d'erreur est constitué d'un générateur de motifs et d'un détecteur d'erreur séparés pouvant être utilisés à distance. Il n'est pas nécessaire pour l'évaluation d'un système avec un équipement de surveillance d'erreur intégré.
- Une source de lumière préréglée, stable à 0,1 dB pendant 1 h, de longueur d'onde semblable à celle du système en essai.
- Un atténuateur optique stable à 0,1 dB pendant 1 h. Un atténuateur supplémentaire de stabilité équivalente peut être nécessaire dans le cas de niveaux élevés de signal au niveau du récepteur, par exemple pour procéder aux essais d'une paire émetteur/récepteur.
- Un séparateur/combinateur optique avec des rapports de séparation typiquement compris entre 50:50 et 10:90 et avec une fibre compatible à celle du système et de la source de lumière de polarisation préréglée.

5.3 Éléments en essai

L'élément en essai peut être un système numérique à fibres optiques constitué d'un émetteur numérique et d'un récepteur numérique couplé à courant continu qui sont connectés par une liaison optique constituée d'une fibre ou d'un câble et qui peut également inclure des composants passifs ou actifs. Si une seule paire émetteur/récepteur doit être soumise à l'essai, il convient de les connecter par un atténuateur optique fixe ou variable.

L'élément en essai peut également être un système de transmission intégré comportant des bornes d'émission et de réception connectées par une liaison optique qui peut elle-même contenir des dispositifs actifs tels que des régénérateurs et/ou des amplificateurs optiques. Un tel système peut inclure un équipement de surveillance d'erreur interne.

5.4 Procédure pour liaison optique de base

Voir Figure 8.

- Actionner l'émetteur et le récepteur, en ajustant le signal reçu avec l'atténuateur optique. Il peut être nécessaire de surveiller la puissance d'entrée du signal optique au niveau du récepteur.
- Ajuster la lumière de polarisation préréglée jusqu'à ce qu'une valeur élevée prédéterminée de TEB, par exemple 10^{-4} , soit atteinte.