

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Calibration of wavelength / optical frequency measurement instruments –
Part 3: Optical frequency meters internally referenced to a frequency comb**

**Étalonnage des appareils de mesure de longueur d'onde / appareil de mesure de
la fréquence optique –
Partie 3: Fréquences optiques faisant référence en interne à un peigne de
fréquence**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2019 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

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

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

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

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Calibration of wavelength / optical frequency measurement instruments –
Part 3: Optical frequency meters internally referenced to a frequency comb**

**Étalonnage des appareils de mesure de longueur d'onde / appareil de mesure de
la fréquence optique –
Partie 3: Fréquencemètres optiques faisant référence en interne à un peigne de
fréquence**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 33.180.01

ISBN 978-2-8322-6922-0

**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.....	3
INTRODUCTION.....	5
1 Scope.....	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	6
4 Calibration test requirements	8
4.1 Organization	8
4.2 Traceability	8
4.3 Preparation	8
4.4 Reference calibration conditions	8
5 Optical frequency calibration	8
5.1 Establishing the calibration conditions	8
5.2 Calibration procedure.....	9
5.2.1 General	9
5.2.2 Measurement configuration.....	9
5.2.3 Detailed procedure	10
5.3 Calibration uncertainty	10
5.4 Reporting the results.....	11
6 Absolute power calibration.....	11
Annex A (normative) Mathematical basis for measurement uncertainty calculations	12
A.1 General.....	12
A.2 Type A evaluation of uncertainty	12
A.3 Type B evaluation of uncertainty	12
A.4 Determining the combined standard uncertainty.....	13
A.5 Reporting	14
Annex B (informative) Measurement method for the frequency of a stabilized laser with an optical frequency comb.....	15
Annex C (informative) Examples of stabilized optical frequency comb source	17
C.1 Method A (pump pulse source and nonlinear optical effect).....	17
C.2 Method B (stabilized laser and electro-optical modulator)	17
Annex D (normative) Frequency-dependence of uncertainty	19
Bibliography.....	20
Figure 1 – Optical frequency meter measurement using a reference source.....	9
Figure 2 – Optical frequency meter measurement using a reference optical frequency meter.....	10
Figure B.1 – Schematic configuration of optical frequency measurement technique using an optical comb	15
Figure B.2 – Optical spectra of lasers and optical frequency combs	16
Figure C.1 – Pump pulse source and nonlinear optical effect	17
Figure C.2 – Electro-optical modulator type comb source.....	18

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**CALIBRATION OF WAVELENGTH /
OPTICAL FREQUENCY MEASUREMENT INSTRUMENTS –****Part 3: Optical frequency meters internally
referenced to a frequency comb****FOREWORD**

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

International Standard IEC 62129-3 has been prepared by IEC technical committee 86: Fibre optics.

This first edition cancels and replaces IEC TS 62129-3, published in 2014.

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

- a) text has been added to 5.2.3 about calibration at a second optical frequency;
- b) Annex D is now normative;
- c) Subclause 4.2 has been improved;
- d) measurement method of frequency has been moved to Annex B;
- e) example of optical frequency comb has been moved to Annex C;
- f) frequency-dependence uncertainty has been moved to Annex D.

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

FDIS	Report on voting
86/551/FDIS	86/554/RVD

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

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

A list of all parts in the IEC 62129 series, published under the general title *Calibration of wavelength/optical frequency measurement instruments*, can be found on the IEC website.

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

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

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.

INTRODUCTION

It is essential for realizing fibre optic systems that optical channels are defined in the optical frequency domain, not the wavelength domain. One example: the anchor frequency of the ITU-T grid is 193,1 THz, and the channel spacings of the ITU-T grid are 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz, and 100 GHz [1]¹.

ITU-T has also discussed λ -interface systems such as "black link" [2]. "Black link" includes WDM MUX/DEMUX and a transmission fibre, and provides λ -interfaces. Especially in DWDM systems (channel spacing < 100 GHz), the uncertainty in specifying optical frequency needs to be minimized.

To implement future telecom systems, it is expected that optical frequency measurements will need to be extremely precise. For example, to achieve the channel spacing of 25 GHz, signal optical frequency uncertainty ($U_{f_{\text{sig}}}$) and required measurement uncertainty ($U_{f_{\text{meas}}}$) need to be 2 GHz to 200 MHz ($U_{f_{\text{sig}}}/f = 10^{-5}$ to 10^{-6}) and 200 MHz to 2 MHz ($U_{f_{\text{meas}}}/f = 10^{-6}$ to 10^{-8}), respectively. Unfortunately, conventional wavelength meters have measurement uncertainties of 10^{-6} to 10^{-7} . The solution is to use optical frequency measurements since measurement uncertainties can be as small as 10^{-9} , which satisfies the above telecom requirement ($U_{f_{\text{meas}}}/f = 10^{-6}$ to 10^{-8}). Therefore, an optical frequency measurement scheme is necessary for the calibration of future telecom systems.

The frequency meter to calibrate with the procedure described in this document is the measurement equipment internally utilizing the optical frequency comb. In Annex A, the mathematical basis for the uncertainty of measurement is described. The measurement procedure of the frequency with the frequency meter utilizing the optical frequency comb is shown in Annex B and the example of the optical frequency comb sources are shown in Annex C. Additionally, the uncertainty depending on the frequency is shown in Annex D.

This document defines all the steps involved in the calibration process of the frequency measuring with the optical frequency meter internally utilizing an optical frequency comb: establishing the calibration conditions, carrying out the calibration, calculating the uncertainty, and reporting the uncertainty, the calibration conditions and the traceability.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

CALIBRATION OF WAVELENGTH / OPTICAL FREQUENCY MEASUREMENT INSTRUMENTS –

Part 3: Optical frequency meters internally referenced to a frequency comb

1 Scope

This part of IEC 62129 describes the calibration of optical frequency meters using an optical frequency comb as an internal reference. It is applicable to instruments measuring the optical frequency emitted from sources that are typical for the fibre-optic communications industry. It is assumed that the optical radiation will be coupled to the optical frequency meter by a single-mode optical fibre. This document is part of the IEC 62129 series on the calibration of wavelength/optical frequency measurement instruments. Refer to IEC 62129-1 [3] for the calibration of optical spectrum analyzers, and refer to IEC 62129-2 [4] for calibration of Michelson interferometer single wavelength meters.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60793-2-50, *Optical fibres – Part 2-50: Product specifications – Sectional specification for class B single-mode fibres*

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

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

IEC TR 61931, *Fibre optic – Terminology*

ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC TR 61931, and the following apply.

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

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

3.1

accredited calibration laboratory

calibration laboratory authorized by the appropriate national organization to issue calibration certificates with a minimum specified uncertainty, which demonstrate traceability to national measurement standards (3.3)

3.2

calibration

set of operations that establish, under specified conditions, the relationship between the values of quantities indicated by a measuring instrument and the corresponding values realized by measurement standards

Note 1 to entry: The result of a calibration permits either the assignment of values of measurands to the indications or the determination of corrections with respect to indications.

Note 2 to entry: A calibration may also determine other metrological properties such as the effect of influence quantities.

Note 3 to entry: The result of a calibration may be recorded in a document, sometimes called a calibration certificate or a calibration report.

[SOURCE: ISO/IEC Guide 99:2007 [5], 2.39, modified – Only the first part of the definition has been used and the notes to entry have been modified.]

3.3

national measurement standard

standard recognized by a national decision to serve, in a country, as the basis for assigning values to other standards for the quantity concerned

[ISO/IEC Guide 99:2007, 5.3, modified – Some terms have been replaced with similar meaning.]

3.4

reference standard

standard, generally having the highest metrological quality available at a given location or in a given organization, from which measurements made therein are derived

Note 1 to entry: The general definition of this term is described in ISO/IEC Guide 99:2007, 5.6.

3.5

traceability

property of the result of a measurement or the value of a measurement standard whereby it can be related to stated references, usually national or international measurement standards, through an unbroken chain of comparisons all having stated uncertainties

Note 1 to entry: The general definition of this term is described in ISO/IEC Guide 99:2007, 2.41.

3.6

traceability chain

unbroken chain of comparison

Note 1 to entry: The general definition of this term is described in ISO/IEC Guide 99:2007, 2.42.

3.7

working standard

measurement standard that is used routinely to calibrate or check measuring instruments

Note 1 to entry: A working standard is usually calibrated against a reference standard.

Note 2 to entry: The general definition of this term is described in ISO/IEC Guide 99:2007, 5.7.

4 Calibration test requirements

4.1 Organization

The calibration laboratory should ensure that suitable requirements for calibration are followed.

NOTE Guidance about good practices for calibration can be found in ISO/IEC 17025 [6].

There shall be a documented measurement procedure for each type of calibration performed, giving step-by-step operating instructions and equipment to be used.

4.2 Traceability

The calibration laboratory should ensure that suitable requirements for traceability are followed.

NOTE Guidance about good practices for traceability can be found in ISO/IEC 17025.

Make sure that any test equipment which has a significant influence on the calibration results is calibrated. Upon request, specify this test equipment and its calibration chain(s). The recalibration period(s) shall be defined and documented.

4.3 Preparation

The environmental conditions shall be commensurate with the degree of uncertainty that is required for calibration:

- a) the environment shall be clean;
- b) temperature monitoring and control is required;
- c) all laser sources shall be safely operated (refer to IEC 60825-1 and to IEC 60825-2).

4.4 Reference calibration conditions

The reference calibration conditions usually include the following parameters and, if necessary, their tolerance bands: date, temperature, relative humidity, displayed power level, displayed optical frequency, fibre, (spectral) bandwidth and resolution bandwidth (spectral resolution) set. Unless otherwise specified, use a single-mode optical fibre input pigtail as specified in IEC 60793-2-50, having a length of at least 2 m.

The calibration should be made in a temperature-controlled environment. The recommended temperature is 23 °C. Depending on the desired uncertainty, the temperature, atmospheric pressure and humidity may need to be monitored during the measurement.

Operate the optical frequency meter in accordance with the manufacturer's specifications and operating procedures. Where practical, select a range of test conditions and parameters which emulate the actual field operating conditions of the optical frequency meter under test. Choose these parameters so as to optimize the optical frequency meter's uncertainties, as specified by the manufacturer's operating procedures.

NOTE The calibration results only apply to the set of test conditions used in the calibration process.

5 Optical frequency calibration

5.1 Establishing the calibration conditions

Establishing and maintaining the calibration conditions is an important part of the calibration, because any change of these conditions is capable of producing erroneous measurement results. The calibration conditions should be a close approximation to the intended operating conditions. This ensures that the (additional) uncertainty in the operating environment is as small as possible. The calibration conditions should be specified in the form of nominal values

with uncertainties when applicable. In order to meet the requirements of this document, the calibration conditions shall at least consist of:

- a) date of calibration;
- b) ambient temperature, for example 23 °C. The temperature may need to be monitored continuously to ensure that it remains within the requisite limits;
- c) ambient relative humidity, for example 30 % to 70 %. The ambient relative humidity may need to be monitored continuously to ensure that it remains within the requisite limits. A relative humidity below the condensation point is assumed by default;
- d) input optical power (that has to fall within the allowable specification for the optical frequency meters);
- e) if a transition locked source is used, then the quality of the lock shall be continuously monitored during the measurements; a lock indicator can be sufficient.

The above conditions may not be exhaustive. There might be other parameters that have a significant influence on the calibration uncertainty.

5.2 Calibration procedure

5.2.1 General

The main steps of the calibration procedure are as follows:

- a) establish and record the appropriate calibration conditions (see 5.1). Switch on all instrumentation and wait until it stabilizes;
- b) set up the reference source in accordance with condition 5.1 d);
- c) set up the instrument state of the test optical frequency meter according to the instruction manual. Select appropriate units;
- d) record the instrument states of the optical frequency meter.

5.2.2 Measurement configuration

Two possible configurations can be used for calibration. One uses a stabilized laser as shown in Figure 1, and the other uses a reference frequency meter as shown in Figure 2.

Figure 1 shows the configuration using the reference source.

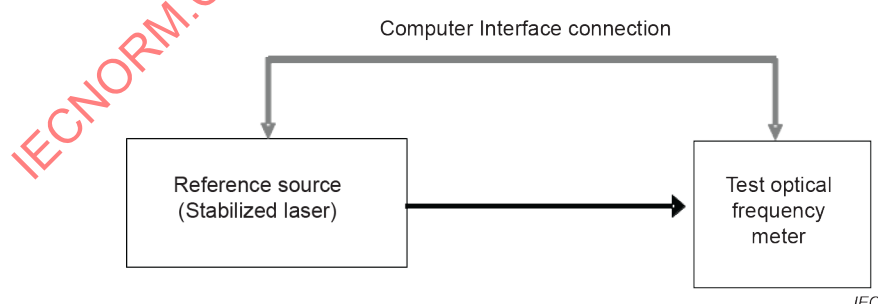


Figure 1 – Optical frequency meter measurement using a reference source

Figure 2 shows the configuration using a reference optical frequency meter.

It is necessary that the measurements be performed simultaneously on both the reference and the test optical frequency meters.

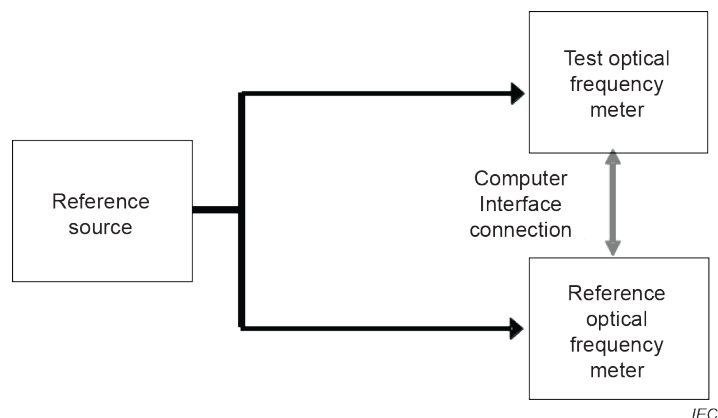


Figure 2 – Optical frequency meter measurement using a reference optical frequency meter

5.2.3 Detailed procedure

The measurement process is as follows:

- allow the equipment to reach equilibrium;
- configure the data acquisition software;
- ensure that the optical source is operating correctly;
- run the data acquisition software.

The correction factor (CF) is determined from the difference between the reference optical frequency and the mean values from each measurement:

$$CF = f_{\text{ref}} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{\text{test}_i} \quad (1)$$

where

f_{ref} is the reference optical frequency, which is the frequency of the reference stabilized laser in calibration of Figure 1 and the frequency of the reference frequency meter in calibration of Figure 2, and

f_{test} is the optical frequency measured by the test optical frequency meter.

In order to obtain the statistical stability of the measurement, it is desirable to take 50 samples (n), for example, per measurement.

It is recommended to repeat the measurement at a second reference optical frequency in case there is an error in the comb spacing frequency. This is described in Annex D.

NOTE The number of measurements averaged per reading affects the size of the results file, the rejection of data by the measurement routine, and the frequency stability of the reference source. A large number of samples per measurement will increase the size of the data set used to check that the extreme data points are valid, and uncertainty of the reference source frequency and the n can be determined with the method of statistical rejection of outlying points described in Annex B of IEC 62129-2:2011.

5.3 Calibration uncertainty

The mathematical basis, Annex A, should be used to calculate and state the uncertainty. Note that the following list may not be complete; additional contributions may have to be taken into account, depending on the measurement setup and procedure:

- a) stability measurement (drift of equipment during measurements taken over a long period of time);
- b) "on/off repeatability" measurement (uncertainty of measured value in repeat of on and off of electric power supply);
- c) frequency dependence measurement (difference in uncertainty due to measured frequency);
- d) uncertainty of the reference frequency meter;
- e) reference source uncertainty (how well the source is stabilized to the natural standard, for example to a molecular absorption line);
- f) display resolution of the test frequency meter (difference between the measured value and displayed value that might be degraded due to resolution);
- g) temperature and relative humidity (uncertainty of performance of components embedded in the equipment due to environmental conditions).

5.4 Reporting the results

Suitable requirements for reporting the results of each calibration should be followed.

NOTE Guidance about good practices for reporting the results of calibration can be found in ISO/IEC 17025.

Calibration certificates referring to this document shall, at a minimum, include the following information:

- a) all calibration conditions of the calibration process as described in 5.1;
- b) the test meter's correction factor(s) or deviation(s), if the test meter was not adjusted;
- c) on receipt, correction factors or deviations and, after adjustment, correction factors or deviations in the case that an adjustment was carried out;
- d) the calibration uncertainty in the form of an expanded uncertainty as described in 5.3 and Annex A;
- e) the configuration of the test meter during the calibration;
- f) evidence that the measurements are traceable (see ISO/IEC 17025).

6 Absolute power calibration

Currently, the frequency meter does not have the function to measure the optical power at a specific optical frequency due to its measurement principle. If the frequency meter has a power measurement capability in the future, then it shall be calibrated using the power meter calibration procedure (IEC 61315 [7]).

Annex A (normative)

Mathematical basis for measurement uncertainty calculations

A.1 General

This annex summarizes the form of evaluating, combining and reporting the uncertainty of measurement. It is based on ISO/IEC Guide 98-3. Annex A shall be read in conjunction with ISO/IEC Guide 98-3 for additional information.

This annex distinguishes two types of evaluation of uncertainty of measurement. Type A is the method of evaluation of uncertainty by the statistical analysis of a series of measurements on the same measurand. Type B is the method of evaluation of uncertainty based on other knowledge.

A.2 Type A evaluation of uncertainty

Type A evaluation of standard uncertainty can be applied when several independent observations have been made for a quantity under the same conditions of measurement.

For a quantity X estimated from n independent repeated observations X_i , the arithmetic mean is:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i) \quad (\text{A.1})$$

This mean is used as the estimate of the quantity, that is $x = \bar{X}$. The experimental standard deviation of the observations is given by:

$$s(X) = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.2})$$

where

$\bar{X}$ is the arithmetic mean of the observed values;

X_i are the measurement samples of a series of measurements;

n is the number of measurements; it is assumed to be large, for example, $n \geq 10$.

The type A standard uncertainty $u_{\text{typeA}}(x)$ associated with the estimate x is the experimental standard deviation of the mean.

$$u_{\text{typeA}}(x) = s(\bar{X}) = \frac{s(X)}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.3})$$

A.3 Type B evaluation of uncertainty

Type B evaluation of standard uncertainty is the method of evaluating the uncertainty by means other than the statistical analysis of a series of observations. It is evaluated by scientific judgement based on all available information on the variability of the quantity.

If the estimate x of a quantity X is taken from a manufacturer's specification, calibration certificate, handbook, or other source and its quoted uncertainty $U(x)$ is stated to be a multiple k of a standard deviation, the standard uncertainty $u(x)$ is simply the quoted value divided by the multiplier:

$$u(x) = \frac{U(x)}{k} \quad (\text{A.4})$$

If only upper and lower limit $X_{\max}$ and $X_{\min}$ can be estimated for the value of the quantity X , a rectangular probability distribution is assumed.

The standard uncertainty is:

$$u(x) = \frac{(|X_{\max} - x|, |X_{\min} - x|)_{\text{MAX}}}{\sqrt{3}} \quad (\text{A.5})$$

The contribution to the standard uncertainty associated with the output estimate y resulting from the standard uncertainty associated with the input estimate x is:

$$u(y) = c \times u(x) \quad (\text{A.6})$$

where c is the sensitivity coefficient associated with the input estimate x , that is the partial derivative of the model function $y(x)$, evaluated at the input estimate x .

The sensitivity coefficient c describes the extent to which the output estimate y is influenced by variations of the input estimate x . It can be evaluated by Equation (A.7) or by using numerical methods, i.e. by calculating the change in the output estimate y due to a change in the input estimate x from a model function. Sometimes it may be more appropriate to find the change in the output estimate y due to the change of x from an experiment.

$$c = \frac{\partial y}{\partial x} \quad (\text{A.7})$$

A.4 Determining the combined standard uncertainty

Combined standard uncertainty is used to collect a number of individual uncertainties into a single number. The combined standard uncertainty is based on statistical independence of the individual uncertainties. It is calculated by root-sum-squaring all standard uncertainties obtained from type A and type B evaluations.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)} \quad (\text{A.8})$$

where

i is the current number of individual contributions;

$u_i(y)$ are the standard uncertainty contributions;

n is the number of uncertainties.

NOTE Uncertainty contributions in Equation (A.8) that are smaller than 1/10 of the largest contribution are negligible, because squaring them will reduce their significance to 1/100 of the largest contribution.

When the quantities above are to be used as the basis for further uncertainty computations, the combined standard uncertainty, u_c , can be re-inserted into Equation (A.8). Despite its partial type A origin, u_c should be considered as describing an uncertainty of type B.

A.5 Reporting

In calibration reports and technical data sheets, combined standard uncertainties shall be reported in the form of expanded uncertainties together with the applicable level of confidence. Correction factors or deviations shall be reported. The expanded uncertainty U is obtained by multiplying the standard uncertainty $u_c(y)$ by a coverage factor k :

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (\text{A.9})$$

For a level of confidence of approximately 95 %, the default level, then $k = 2$. If a level of confidence of approximately 99 % is chosen, then $k = 3$. The above values for k are valid under some conditions (see GUM); if these conditions are not met, other coverage factors are to be used to reach these levels of confidence.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62129-3:2019

Annex B (informative)

Measurement method for the frequency of a stabilized laser with an optical frequency comb

For optical frequency measurement, equally-spaced frequency comb lines (spacing of up to 50 GHz) from an optical frequency comb are utilized as a ruler for optical frequency measurement [8 to 19]. Optical frequency measurements provide more accurate calibration than interferometric wavelength measurements in air by eliminating the effects of refractive indices.

Some examples of practical optical frequency comb are shown in Annex C.

Figure B.1 is the schematic configuration of an optical frequency measurement technique that uses optical frequency combs.

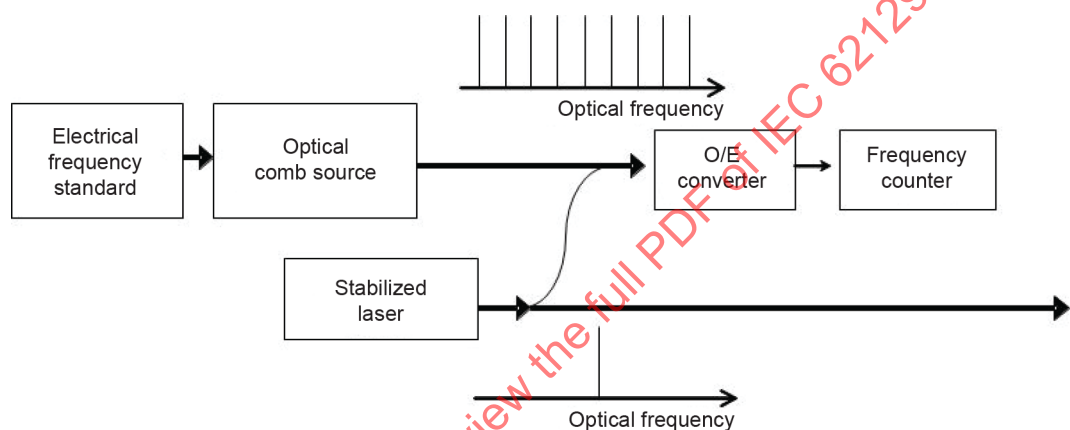


Figure B.1 – Schematic configuration of optical frequency measurement technique using an optical comb

Figure B.2 shows the optical spectrum of the laser and the optical frequency comb. The optical frequency comb generates an optical frequency comb with uniform spacing ($f(\text{comb spacing})$) which is equal to the frequency of the electrical frequency standard driving the optical frequency comb. $f(\text{comb spacing})$ is also equal to the pulse repetition rate. Thus, the uncertainty of comb spacing is proportional to the uncertainty of the frequency of the electrical frequency standard. The comb spacing generally lies between 100 MHz and 25 GHz. In this case, the stabilized laser ($f_{\text{stabilized laser}}$) output is combined with the optical frequency comb, and then these two lights are input to an optical-electrical (O/E) converter. The beat frequency (f_{beat}) between the two lights is taken as the output of the O/E converter. The optical frequency ($f_{\text{stabilized laser}}$) of the stabilized laser can be calculated by Equation (B.1).

$$f_{\text{stabilized laser}} = f(N) \pm f_{\text{beat}} \quad (\text{B.1})$$

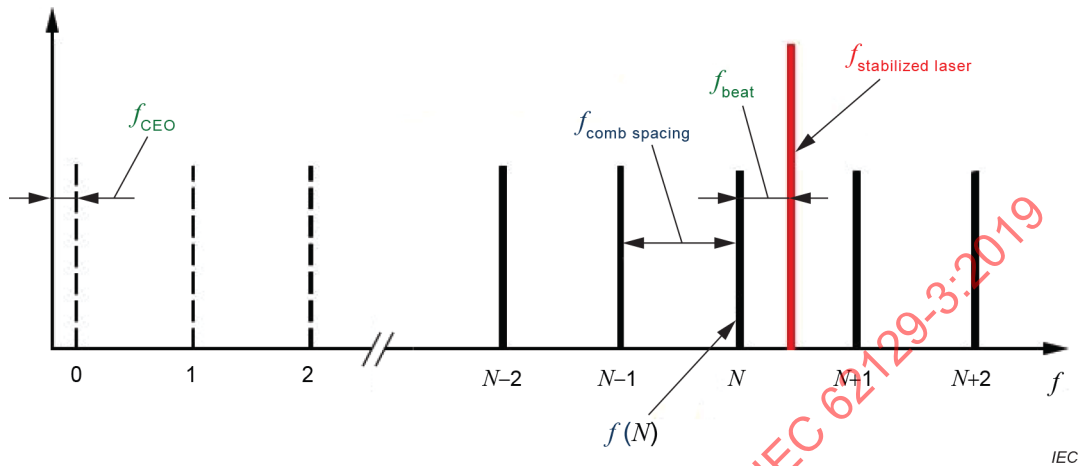
Here, $f(N)$ is the optical frequency of the N -th mode of optical frequency comb, and is the summation of $f_{\text{comb spacing}}$ and the carrier envelope offset frequency f_{CEO} , as shown in Equation (B.2).

$$f(N) = N \times f_{\text{comb spacing}} + f_{\text{CEO}} \quad (\text{B.2})$$

Here, N is the large integer, and can be determined with a wavelength meter. The sign of the beat frequency (+ or -) can be deduced by changing $f_{\text{stabilized laser}}$, $f_{\text{comb spacing}}$ or f_{CEO} slightly.

f_{CEO} is related to the pulse-to-pulse phase shift, $\Delta\varphi$, between the peak of the electrical field and the peak of the envelope [9], as shown in Equation (B.3).

$$f_{\text{CEO}} = (\Delta\varphi / 2\pi) f_{\text{comb spacing}} \quad (\text{B.3})$$



Key

f	optical frequency
$f_{\text{stabilized laser}}$	stabilized laser frequency
$f_{\text{comb spacing}}$	comb spacing
f_{beat}	beat frequency
$f(N)$	optical frequency of the N-th comb mode
f_{CEO}	carrier envelope offset frequency

Figure B.2 – Optical spectra of lasers and optical frequency combs

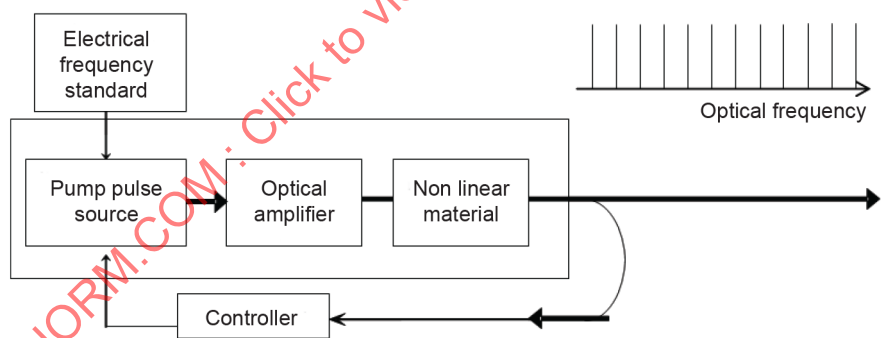
Annex C (informative)

Examples of stabilized optical frequency comb source

C.1 Method A (pump pulse source and nonlinear optical effect)

Figure C.1 shows an optical comb system combining a pump pulse source and nonlinear optical effects [8 to 17, 19]. The pump pulse source generates an optical pulse train with a repetition rate of $f_{\text{frequency standard}}$. The pump pulse train is amplified when the pulse power is small. The optical pulse train is input to a nonlinear material (fibre, etc.) and the resulting spectral broadening can exceed an octave. By comparing the optical frequencies of the octave-broadened comb with those of the second harmonic, one can stabilize and measure the frequency offset (f_{CEO}). The frequencies f_{CEO} and $f_{\text{comb spacing}}$ are locked to the electrical frequency standard, thus yielding a very stable optical comb without the use of an external stabilized laser. The uncertainty of the optical comb is determined by that of the electrical frequency standard, so very small values can be expected.

The pump pulse source can be realized with several sources. For example, a mode-locked laser can be utilized. A titanium-doped sapphire (Ti:S) laser or a fibre laser can be used as the mode-locked laser. These optical frequency comb systems can be extended to any IR wavelength region (1 μm to 2 μm). As a second example, the supercontinuum (SC) comb source can be utilized. SC is a spectral broadening phenomenon and is realized when nonlinear materials are pumped by short optical pulses. It occurs due to the combined effects of self-phase modulation; cross-phase modulation; parametric, four-wave mixing; and Raman scattering. A superbroadened bandwidth of more than 200 nm (25 THz) with the spacing range from several GHz to several 10 GHz at 1,5 μm and the uncertainty of 1 MHz for 25 GHz spacing in the telecom bands has been reported [19].

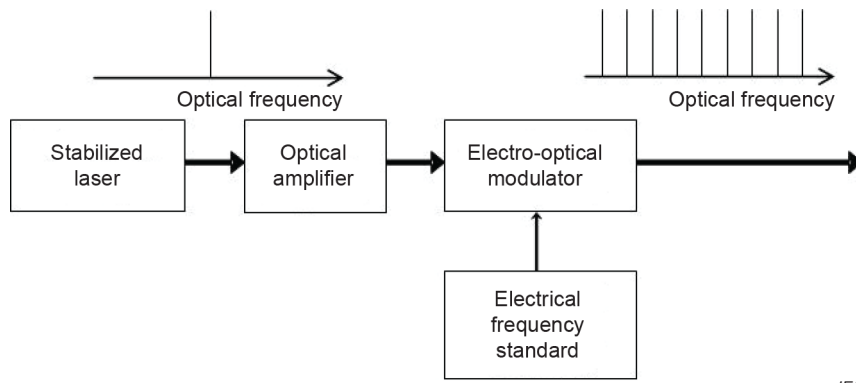


IEC

Figure C.1 – Pump pulse source and nonlinear optical effect

C.2 Method B (stabilized laser and electro-optical modulator)

Figure C.2 shows an electro-optical modulator type comb source with a stabilized laser. The stabilized laser output is amplified and then input into the electro-optical modulator which is driven by an electrical frequency standard. This method has been reported to offer 5 THz bandwidth optical comb generation with 6,25 GHz spacing [18].



IEC

Figure C.2 – Electro-optical modulator type comb source

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62129-3:2019

Annex D (normative)

Frequency-dependence of uncertainty

This annex describes how the frequency measurement uncertainty with frequency combs is affected by the uncertainty of the frequency of the electrical frequency standard.

The uncertainty arising from the electrical frequency standards in Clauses C.1 and C.2 will affect the mode spacing in a way that varies with comb mode number.

From Equation (B.1)

$$f_{\text{meas}} = f_0 + N \times f_{\text{comb spacing}} \pm f_{\text{beat}} \quad (\text{D.1})$$

where f_{meas} is the measured frequency value and $f_0 = f_{\text{CEO}}$ in Clause C.1 and $f_{\text{stabilized laser}}$ in Clause C.2. Therefore, the uncertainty in the comb spacing is multiplied by N , which varies depending on the frequency of the tunable laser under test.

For example, when the uncertainty arising from the electrical frequency standard is less than 10^{-8} and the measurement frequency range is 5 THz, an uncertainty of less than 50 kHz can be realized within the entire measurement frequency range. However, if the uncertainty of the electrical frequency standard degrades to 10^{-6} , the measurement uncertainty in the frequency of 25 GHz away from the stabilized laser will be 25 kHz; whereas at a 5 THz separation, it will be 5 MHz. In this case, the frequency dependent uncertainty can exceed the measurement uncertainty required for telecom systems (i.e. 200 MHz to 2 MHz) for some frequency values.

When the uncertainty of $f_{\text{comb spacing}}$ is not sufficiently well known, it is recommended to test the device at a minimum of two different reference optical frequencies having a minimum frequency separation larger than 10 times the comb repetition frequency $f_{\text{comb spacing}}$ and thus calculating $\Delta f = f_{\text{meas}} - f_{\text{ref}}$ for these two measurements. This allows the estimation of two different correction factors, namely an offset frequency Δf_{offset} and an error slope S , according to:

$$\Delta f = f_{\text{meas}} - f_{\text{ref}} = \Delta f_{\text{offset}} + S f_{\text{ref}} \quad (\text{D.2})$$

Bibliography

- [1] ITU-T Recommendation G.694.1, *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*
- [2] ITU-T Recommendation G.695, *Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications*
- [3] IEC 62129-1, *Calibration of wavelength/optical frequency measurement instruments – Part 1: Optical spectrum analyzers*
- [4] IEC 62129-2:2011, *Calibration of wavelength/optical frequency measurement instruments – Part 2: Michelson interferometer single wavelength meters*
- [5] ISO/IEC GUIDE 99:2007, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*
- [6] ISO/IEC 17025, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*
- [7] IEC 61315, *Calibration of fibre-optic power meters*
- [8] UDEM, T. et al., Absolute Optical Frequency Measurement of the Cesium D_1 Line with a Mode-Locked Laser. *Phys. Rev. Lett.*, 82, 3568–3571 (1999)
- [9] JONES, DJ. et al., Carrier-Envelope Phase Control of Femtosecond Mode-Locked Lasers and Direct Optical Frequency Synthesis. *Science*, 288, p. 635–639 (2000)
- [10] UDEM, T. et al., Optical frequency metrology. *Nature*, 416, p. 233–237 (2002)
- [11] http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2005/
- [12] HONG, F-L. et al., Absolute frequency measurement of an acetylene-stabilized laser at 1542 nm. *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 23, p. 2324–2326 (2003)
- [13] EDWARDS, CS. et al., Absolute frequency measurement of a 1.5- μ m acetylene standard by use of a combined frequency chain and femtosecond comb. *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 6, p. 566–568 (2004)
- [14] SCHIBLI, TR. et al., Frequency metrology with a turnkey all-fiber system. *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 21, p. 2467–2469 (2004)
- [15] INABA, H. et al., Long-term measurement of optical frequencies using a simple, robust and low-noise fiber based frequency comb. *Optics Express*, vol. 14, no. 12, p. 5223–5231 (2006)
- [16] NEWBURY, NR. et al., Low-noise fiber-laser frequency combs (Invited). *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 24, no. 8, p. 1756–1770 (2007)
- [17] PENG, J-L. et al., Optical frequency counter based on two mode-locked fiber laser combs. *Appl. Phys B*, vol. 92, p. 513–518 (2008)
- [18] KOUROGI, M. et al., Wide-span optical frequency comb generator for accurate optical frequency difference measurement. *IEEE J. Quantum Electron.*, 29, p. 2693 (1993)

- [19] SUZUKI, K. et al., MHz-accuracy, 25 GHz-spaced frequency-stabilised optical comb over S-, C-, L-bands for precise optical frequency measurements. *Electron. Lett.*, vol. 40, no. 17, p. 1078–1079 (2004)
- [20] IEC 60359, *Electrical and electronic measuring equipment – Expression of performance*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62129-3:2019

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	23
INTRODUCTION.....	25
1 Domaine d'application	26
2 Références normatives	26
3 Termes et définitions	26
4 Exigences d'essai d'étalonnage	28
4.1 Organisation	28
4.2 Traçabilité	28
4.3 Préparation	28
4.4 Conditions d'étalonnage de référence	28
5 Étalonnage de fréquence optique	29
5.1 Établissement des conditions d'étalonnage	29
5.2 Procédure d'étalonnage	29
5.2.1 Généralités	29
5.2.2 Configuration de mesure	29
5.2.3 Procédure détaillée	30
5.3 Incertitude d'étalonnage	31
5.4 Consignation des résultats	31
6 Étalonnage de puissance absolue	32
Annexe A (normative) Base mathématique pour les calculs de l'incertitude de mesure	33
A.1 Généralités	33
A.2 Évaluation de Type A de l'incertitude	33
A.3 Évaluation de Type B de l'incertitude	33
A.4 Détermination de l'incertitude type composée	34
A.5 Consignation dans un rapport	35
Annexe B (informative) Méthode de mesure de la fréquence d'un laser stabilisé avec un peigne de fréquence optique	36
Annexe C (informative) Exemples de source de peigne de fréquence optique stabilisée	38
C.1 Méthode A (source d'impulsion de pompe + effet optique non linéaire)	38
C.2 Méthode B (laser stabilisé + modulateur électro-optique)	38
Annexe D (normative) Dépendance à la fréquence de l'incertitude	40
Bibliographie	41
Figure 1 – Mesurage de fréquences à l'aide d'une source de référence	30
Figure 2 – Mesurage de fréquences à l'aide d'un fréquences optique de référence	30
Figure B.1 – Configuration schématique d'une technique de mesure de la fréquence optique à l'aide d'un peigne de fréquence	36
Figure B.2 – Spectre optique des lasers et des peignes de fréquence optique	37
Figure C.1 – Source d'impulsion de pompe + effet optique non linéaire	38
Figure C.2 – Source de peigne de type de modulateur électro-optique	39

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**ÉTALONNAGE DES APPAREILS DE MESURE DE LONGUEUR D'ONDE /
APPAREIL DE MESURE DE LA FRÉQUENCE OPTIQUE –****Partie 3: Fréquencemètres optiques faisant référence
en interne à un peigne de fréquence**

AVANT-PROPOS

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

La présente Norme internationale IEC 62129-3 a été établie par le comité d'études 86 de l'IEC: Fibres optiques.

Cette première édition annule et remplace l'IEC TS 62129-3, parue en 2014.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente.

- a) un texte a été ajouté en 5.2.3 concernant l'étalonnage à une seconde fréquence optique;
- b) l'Annexe D est désormais normative;
- c) Le paragraphe 4.2 a été amélioré;

- d) la méthode de mesure de la fréquence a été déplacée à l'Annexe B;
- e) l'exemple de peigne de fréquence optique a été déplacé à l'Annexe C;
- f) l'incertitude de dépendance à la fréquence a été déplacée à l'Annexe D.

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

FDIS	Rapport de vote
86/551/FDIS	86/554/RVD

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

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

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62129, publiées sous le titre général *Étalonnage des appareils de mesure de longueur d'onde/appareil de mesure de la fréquence optique*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

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

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

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

INTRODUCTION

Pour concevoir des systèmes à fibres optiques, il est essentiel de définir les voies optiques dans le domaine de fréquence optique, pas dans celui de longueur d'onde. Par exemple: la fréquence d'ancrage du réseau UIT-T est de 193,1 THz et les espacements de voie du réseau UIT-T sont de 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz et 100 GHz [1]¹.

L'UIT-T a également présenté les systèmes d'interface λ tels que la "liaison noire" [2]. La "liaison noire" inclut un multiplexage en longueur d'onde (WDM) MUX/DEMUX et une fibre de transmission, et fournit les interfaces λ . En particulier, dans les systèmes de multiplexage par répartition en longueurs d'onde dense (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*) (espacement de voie < 100 GHz), il est nécessaire de réduire le plus possible l'incertitude en spécifiant la fréquence optique.

Pour mettre en œuvre les futurs systèmes de télécommunication, il est nécessaire que les mesurages de la fréquence optique soient extrêmement précis. Par exemple, pour obtenir un espacement de voie de 25 GHz, il est nécessaire que l'incertitude de la fréquence optique du signal ($U_{f_{\text{sig}}}$) et l'incertitude de mesure exigée ($U_{f_{\text{meas}}}$) soient respectivement comprises entre 2 GHz et 200 MHz ($U_{f_{\text{sig}}}/f = 10^{-5}$ à 10^{-6}) et entre 200 MHz et 2 MHz ($U_{f_{\text{meas}}}/f = 10^{-6}$ à 10^{-8}). Malheureusement, les appareils de mesure de longueur d'onde conventionnels présentent des incertitudes de mesure comprises entre 10^{-6} et 10^{-7} . La solution consiste à utiliser des mesurages de fréquence optique, étant donné que les incertitudes de mesure peuvent être aussi faibles que 10^{-9} , ce qui satisfait à l'exigence ci-dessus en matière de télécommunication ($U_{f_{\text{meas}}}/f = 10^{-6}$ à 10^{-8}). Par conséquent, un schéma de mesure de fréquence optique est nécessaire pour l'étalonnage des futurs systèmes de télécommunication.

Le fréquencemètre à étalonner selon la procédure décrite dans le présent document est l'appareil de mesure utilisant en interne le peigne de fréquence optique. L'Annexe A décrit la base mathématique de l'incertitude de mesure. La procédure de mesure de la fréquence à l'aide du fréquencemètre utilisant le peigne de fréquence optique est présentée à l'Annexe B. Des exemples de sources de peigne de fréquence optique sont donnés à l'Annexe C. De plus, l'incertitude en fonction de la fréquence est présentée à l'Annexe D.

Le présent document définit toutes les étapes du processus d'étalonnage de la mesure de la fréquence à l'aide du fréquencemètre optique utilisant en interne un peigne de fréquence optique: établissement des conditions d'étalonnage, réalisation de l'étalonnage, calcul de l'incertitude et consignation de l'incertitude, des conditions d'étalonnage et de la traçabilité.

¹ Les numéros entre crochets font référence à la Bibliographie.

ÉTALONNAGE DES APPAREILS DE MESURE DE LONGUEUR D'ONDE / APPAREIL DE MESURE DE LA FRÉQUENCE OPTIQUE –

Partie 3: Fréquencemètres optiques faisant référence en interne à un peigne de fréquence

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62129 décrit l'étalonnage des fréquencemètres optiques à l'aide d'un peigne de fréquence optique en référence interne. Elle s'applique aux appareils de mesure de la fréquence optique provenant des sources habituelles dans les secteurs des communications à fibres optiques. Il est pris pour hypothèse que le rayonnement optique est couplé au fréquencemètre optique par une fibre optique unimodale. Le présent document fait partie de la série IEC 62129 relative à l'étalonnage des appareils de mesure de longueur d'onde/appareils de mesure de la fréquence optique. Voir l'IEC 62129-1 [3] pour l'étalonnage des analyseurs de spectre optique, et l'IEC 62129-2 [4] pour l'étalonnage des appareils de mesure de longueur d'onde unique à interféromètre de Michelson.

2 Références normatives

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

IEC 60793-2-50, *Fibres optiques – Partie 2-50: Spécifications de produits – Spécification intermédiaire pour les fibres unimodales de classe B*

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

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

IEC TR 61931, *Fibres optiques – Terminologie*

ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC TR 61931, ainsi que les suivants, s'appliquent.

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

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

3.1

laboratoire d'étalonnage accrédité

laboratoire d'étalonnage autorisé par l'organisation nationale compétente à publier des certificats d'étalonnage avec une incertitude minimale spécifiée et qui démontrent la traçabilité aux étalons nationaux (3.3)

3.2

étalonnage

ensemble des opérations qui établissent, dans des conditions spécifiées, la relation entre les valeurs des grandeurs indiquées par l'appareil de mesure et les valeurs correspondantes indiquées par les étalons

Note 1 à l'article: Le résultat d'un étalonnage permet d'attribuer des valeurs de mesurandes aux indications ou de déterminer les corrections en fonction des indications.

Note 2 à l'article: Un étalonnage peut également déterminer d'autres propriétés métrologiques telles que l'effet des grandeurs d'influence.

Note 3 à l'article: Le résultat d'un étalonnage peut être consigné dans un document, parfois appelé "certificat d'étalonnage" ou "rapport d'étalonnage".

[SOURCE: ISO/IEC Guide 99:2007 [5], 2.39, modifié – Seule la première partie de la définition a été utilisée et les notes à l'article ont été modifiées.]

3.3

étalon national

étalon reconnu par une décision officielle nationale pour servir de base, dans un pays, à l'attribution de valeurs à d'autres étalons de grandeurs de la même nature

[ISO/IEC Guide 99:2007, 5.3, modifié – Certains termes ont été remplacés par d'autres de signification équivalente.]

3.4

étalon de référence

étalon, en général de la plus haute qualité métrologique, disponible en un lieu donné ou dans une organisation donnée dont dérivent les mesurages qui y sont effectués

Note 1 à l'article: La définition générale de ce terme est donnée dans l'ISO/IEC Guide 99:2007, 5.6.

3.5

traçabilité

propriété du résultat d'une mesure ou de la valeur d'un étalon telle qu'elle peut être associée à des références, habituellement des étalons nationaux ou internationaux, par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue de comparaisons ayant toutes des incertitudes déterminées

Note 1 à l'article: La définition générale de ce terme est donnée dans l'ISO/IEC Guide 99:2007, 2.41.

3.6

chaîne de traçabilité

chaîne ininterrompue de comparaisons

Note 1 à l'article: La définition générale de ce terme est donnée dans la source: ISO/IEC Guide 99:2007, 2.42.

3.7

étalon de travail

étalon qui est utilisé couramment pour étalonner ou contrôler des instruments de mesure

Note 1 à l'article: Un étalon de travail est habituellement étalonné par rapport à un étalon de référence.

Note 2 à l'article: La définition générale de ce terme est donnée dans l'ISO/IEC Guide 99:2007, 5.7.

4 Exigences d'essai d'étalonnage

4.1 Organisation

Le laboratoire d'étalonnage doit s'assurer que les exigences appropriées en matière d'étalonnage sont suivies.

NOTE Les conseils sur les bonnes pratiques en matière d'étalonnage sont disponibles dans l'ISO/IEC 17025 [6].

Une procédure de mesure doit être documentée pour chaque type d'étalonnage réalisé, en indiquant les instructions de fonctionnement étape par étape et le matériel à utiliser.

4.2 Traçabilité

Le laboratoire d'étalonnage doit s'assurer que les exigences appropriées en matière de traçabilité sont suivies.

NOTE Les conseils sur les bonnes pratiques en matière de traçabilité sont disponibles dans l'ISO/IEC 17025.

Veiller à étalonner les matériels d'essai ayant un impact significatif sur les résultats de l'étalonnage. À la demande, spécifier ce matériel d'essai et sa ou ses chaînes d'étalonnage. La ou les périodes de réétalonnage doivent être définies et documentées.

4.3 Préparation

Les conditions d'environnement doivent correspondre au degré d'incertitude exigé pour l'étalonnage:

- a) l'environnement doit être propre;
- b) il est exigé de surveiller et de contrôler la température;
- c) toutes les sources laser doivent fonctionner en toute sécurité (voir l'IEC 60825-1 et l'IEC 60825-2).

4.4 Conditions d'étalonnage de référence

En règle générale, les conditions d'étalonnage de référence incluent les paramètres suivants et, le cas échéant, leurs bandes de tolérance: date, température, humidité relative, niveau de puissance affiché, fréquence optique affichée, fibre, bande passante (spectrale) et bande passante de résolution (résolution spectrale) réglées. Sauf spécification contraire, utiliser une (fibre) amorce unimodale comme indiqué dans l'IEC 60793-2-50, d'au moins 2 m de long.

Il convient de procéder à l'étalonnage dans un environnement à température contrôlée. La température recommandée est de 23 °C. Selon l'incertitude souhaitée, il peut s'avérer nécessaire de surveiller la température, la pression atmosphérique et l'humidité pendant le mesurage.

Faire fonctionner le fréquencesmètre optique conformément aux spécifications du fabricant et aux procédures de fonctionnement. Dans la mesure du possible, choisir une plage de conditions et paramètres d'essai permettant d'émuler les conditions de fonctionnement réelles sur le terrain du fréquencesmètre optique en essai. Choisir ces paramètres de manière à optimiser les incertitudes du fréquencesmètre optique, comme indiqué par les procédures de fonctionnement du fabricant.

NOTE Les résultats d'étalonnage s'appliquent uniquement à l'ensemble des conditions d'essai utilisées dans le processus d'étalonnage.

5 Étalonnage de fréquence optique

5.1 Établissement des conditions d'étalonnage

L'établissement et le maintien des conditions d'étalonnage sont une étape importante de l'étalonnage, toute variation de ces conditions étant susceptible de produire des résultats de mesure erronés. Il convient que les conditions d'étalonnage soient une approximation proche des conditions de fonctionnement prévues, ce qui permet de vérifier que l'incertitude (supplémentaire) dans l'environnement de fonctionnement est aussi réduite que possible. Il convient de spécifier les conditions d'étalonnage sous la forme de valeurs nominales avec des incertitudes, le cas échéant. Pour satisfaire aux exigences du présent document, les conditions d'étalonnage doivent au moins comprendre:

- a) la date de l'étalonnage;
- b) la température ambiante (23 °C, par exemple). Il peut s'avérer nécessaire de surveiller en permanence la température afin d'assurer qu'elle reste dans les limites requises;
- c) l'humidité relative ambiante (30 % à 70 %, par exemple). Il peut s'avérer nécessaire de surveiller en permanence l'humidité relative ambiante afin d'assurer qu'elle reste dans les limites requises. Par défaut, une humidité relative est réputée être inférieure au point de condensation;
- d) la puissance optique d'entrée (qui doit se trouver dans la spécification admissible pour les fréquences optiques);
- e) si une source verrouillée de transition est utilisée, la qualité du verrouillage doit être surveillée en permanence pendant les mesurages. Un indicateur de verrouillage peut s'avérer suffisant.

Les conditions ci-dessus peuvent ne pas être exhaustives. D'autres paramètres peuvent avoir une influence significative sur l'incertitude d'étalonnage.

5.2 Procédure d'étalonnage

5.2.1 Généralités

Les principales étapes de la procédure d'étalonnage sont les suivantes:

- a) établir et consigner les conditions d'étalonnage appropriées (voir 5.1). Mettre tous les instruments sous tension et attendre leur stabilisation;
- b) régler la source de référence selon la condition 5.1 d);
- c) régler l'état de l'appareil du fréquencesmètre optique d'essai conformément au manuel d'instructions. Sélectionner les unités appropriées;
- d) consigner les états de l'appareil du fréquencesmètre optique.

5.2.2 Configuration de mesure

Deux configurations possibles peuvent être utilisées pour l'étalonnage. L'une utilise un laser stabilisé (voir la Figure 1) et l'autre un fréquencesmètre de référence (voir la Figure 2).

La Figure 1 représente la configuration à l'aide d'une source de référence.

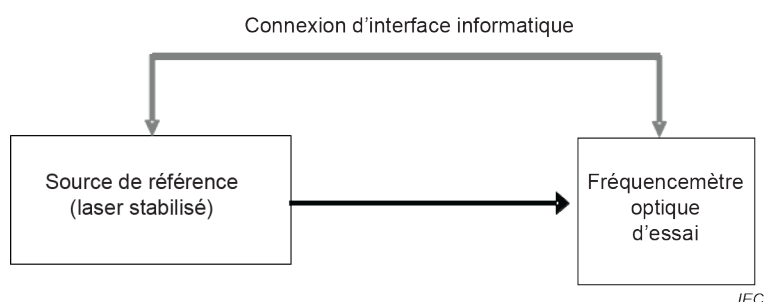


Figure 1 – Mesurage de fréquencemètre optique à l'aide d'une source de référence

La Figure 2 représente la configuration à l'aide d'un fréquencemètre optique de référence.

Il est nécessaire de procéder aux mesurages en même temps sur le fréquencemètre optique de référence et le fréquencemètre optique d'essai.

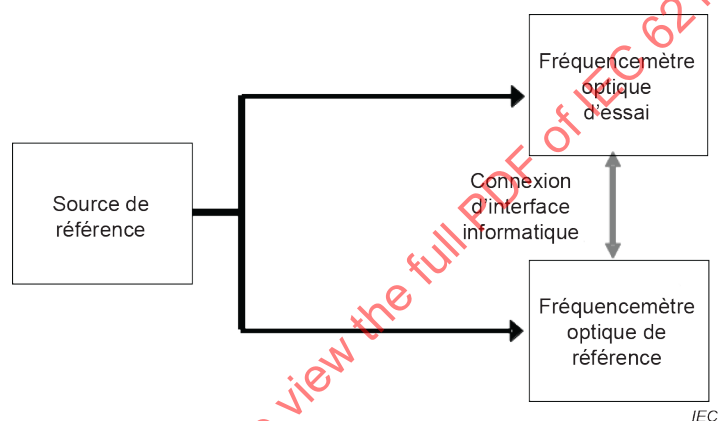


Figure 2 – Mesurage de fréquencemètre optique à l'aide d'un fréquencemètre optique de référence

5.2.3 Procédure détaillée

Le processus de mesure est le suivant:

- laisser le matériel atteindre l'équilibre;
- configurer le logiciel d'acquisition de données;
- vérifier que la source optique fonctionne correctement;
- exécuter le logiciel d'acquisition de données.

Le facteur de correction (*CF* – *correction factor*) est déterminé par la différence entre la fréquence optique de référence et les valeurs moyennes de chaque mesurage:

$$CF = f_{\text{ref}} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{\text{test}_i} \quad (1)$$

où

f_{ref} est la fréquence optique de référence, qui est la fréquence du laser stabilisé de référence dans l'étalonnage de la Figure 1 et la fréquence du fréquencemètre de référence dans l'étalonnage de la Figure 2, et

f_{test} est la fréquence optique mesurée par le fréquencemètre optique d'essai.

Pour assurer la stabilité statistique du mesurage, par exemple, il est souhaitable de prélever 50 échantillons (n) par mesurage.

Il est recommandé de répéter le mesurage avec une seconde fréquence optique de référence, en cas d'erreur dans la fréquence d'espacement du peigne. Cette opération est décrite à l'Annexe D.

NOTE Le nombre de mesures moyennées par relevé a un impact sur la taille du fichier de résultats, le rejet des données par la routine de mesure et la stabilité de fréquence de la source de référence. Un grand nombre d'échantillons par mesurage augmente la taille de l'ensemble de données utilisé pour vérifier la validité des points de données extrêmes, et l'incertitude de la fréquence de la source de référence et le nombre n peut être déterminé par la méthode de rejet statistique des points éloignés décrits à l'Annexe B de l'IEC 62129-2:2011.

5.3 Incertitude d'étalonnage

Il convient d'utiliser la base mathématique de l'Annexe A pour calculer et établir l'incertitude. Noter que la liste suivante peut ne pas être exhaustive; il peut devoir être nécessaire de prendre en compte des contributions supplémentaires, en fonction de l'installation et de la procédure de mesure;

- a) mesurage de la stabilité (dérive du matériel pendant les mesurages de longue durée);
- b) mesurage de la "répétabilité marche/arrêt" (incertitude de la valeur mesurée en répétition de marche/arrêt de l'alimentation électrique);
- c) mesurage de la dépendance à la fréquence (différence d'incertitude due à la fréquence mesurée);
- d) incertitude du fréquencemètre de référence;
- e) incertitude de la source de référence (dans quelle mesure la source est stabilisée par rapport à l'étalon naturel, à une ligne d'absorption moléculaire, par exemple);
- f) résolution d'affichage du fréquencemètre d'essai (différence entre la valeur mesurée et la valeur affichée qui peut être dégradée à cause de la résolution);
- g) température et humidité relative (incertitude de performance des composants intégrés au matériel en raison des conditions d'environnement).

5.4 Consignation des résultats

Les exigences appropriées pour le rapport des résultats de chaque étalonnage doivent être suivies.

NOTE Les conseils sur les bonnes pratiques pour rapporter les résultats d'étalonnage sont disponibles dans l'ISO/IEC 17025.

Les certificats d'étalonnage citant le présent document en référence doivent au moins inclure les informations suivantes:

- a) toutes les conditions d'étalonnage du processus d'étalonnage (voir 5.1);
- b) le ou les facteurs de correction ou l'écart ou les écarts de l'appareil de mesure d'essai, s'il n'a pas été réglé;
- c) à réception, les facteurs de correction ou les écarts et, après réglage, les facteurs de correction ou les écarts dans le cas où un réglage a été réalisé;
- d) l'incertitude d'étalonnage sous la forme d'une incertitude élargie (voir 5.3 et l'Annexe A);
- e) la configuration de l'appareil de mesure pendant l'étalonnage;
- f) la preuve que les mesurages sont traçables (voir l'ISO/IEC 17025).

6 Étalonnage de puissance absolue

Actuellement, aucune fonction du fréquencemètre ne permet de mesurer la puissance optique à une fréquence optique particulière à cause de son principe de mesure. Si le fréquencemètre est amené à être équipé d'une capacité de mesure de la puissance, il doit être étalonné à l'aide de la procédure d'étalonnage de wattmètre (IEC 61315 [7]).

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62129-3:2019

Annexe A (normative)

Base mathématique pour les calculs de l'incertitude de mesure

A.1 Généralités

La présente annexe récapitule le format d'évaluation, de combinaison et de consignation de l'incertitude de mesure. Elle repose sur l'ISO/IEC GUIDE 98-3. Pour de plus amples informations, l'Annexe A doit être lue conjointement avec le Guide 98-3 de l'ISO/IEC.

La présente annexe distingue deux types d'évaluations de l'incertitude de mesure. Le Type A est la méthode d'évaluation de l'incertitude par analyse statistique d'une série de mesures sur le même mesurande. Le Type B est la méthode d'évaluation de l'incertitude en fonction d'autres connaissances.

A.2 Évaluation de Type A de l'incertitude

L'évaluation de Type A de l'incertitude type peut être appliquée lorsque plusieurs observations indépendantes ont été réalisées pour une grandeur dans les mêmes conditions de mesure.

Pour une grandeur X estimée à partir de n observations répétées indépendantes X_i , la moyenne arithmétique est:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i) \quad (\text{A.1})$$

Cette moyenne est utilisée comme estimation de la grandeur, c'est-à-dire $x = \bar{X}$. L'écart type expérimental des observations est donné par:

$$s(X) = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.2})$$

où

$\bar{X}$ est la moyenne arithmétique des valeurs observées;

X_i sont les échantillons de mesure d'une série de mesures;

n est le nombre de mesures; l'hypothèse retenue est qu'il est important ($n \geq 10$, par exemple).

L'incertitude type de Type A $u_{\text{typeA}}(x)$ associée à l'estimation x est l'écart type expérimental de la moyenne

$$u_{\text{typeA}}(x) = s(\bar{X}) = \frac{s(X)}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.3})$$

A.3 Évaluation de Type B de l'incertitude

L'évaluation de Type B de l'incertitude type est la méthode permettant d'évaluer l'incertitude par d'autres moyens que l'analyse statistique d'une série d'observations. L'incertitude est

évaluée par jugement scientifique reposant sur toutes les informations disponibles relatives à la variabilité de la grandeur.

Si l'estimation x d'une grandeur X provient d'une spécification du fabricant, d'un certificat d'étalonnage, d'un manuel ou d'une autre source et que son incertitude $U(x)$ mentionnée est un multiple k d'un écart type, l'incertitude type $u(x)$ est simplement la valeur indiquée divisée par le multiplicateur:

$$u(x) = \frac{U(x)}{k} \quad (\text{A.4})$$

Si seules les limites supérieure et inférieure $X_{\max}$ et $X_{\min}$ peuvent être estimées pour la valeur de la grandeur X , une loi de probabilité rectangulaire est prise pour hypothèse.

L'incertitude type est:

$$u(x) = \frac{(|X_{\max} - x|, |X_{\min} - x|)_{\text{MAX}}}{\sqrt{3}} \quad (\text{A.5})$$

La contribution à l'incertitude type associée à l'estimation de sortie y résultant de l'incertitude type associée à l'estimation d'entrée x est:

$$u(y) = c \times u(x) \quad (\text{A.6})$$

où c est le coefficient de sensibilité associé à l'estimation d'entrée x , qui est la dérivée partielle de la fonction modèle $y(x)$, évaluée au niveau de l'estimation d'entrée x .

Le coefficient de sensibilité c décrit dans quelle mesure les variations de l'estimation d'entrée x ont un impact sur l'estimation de sortie y . Il peut être évalué par l'Équation (A.7) ou par des méthodes numériques, c'est-à-dire en calculant la variation de l'estimation de sortie y en raison d'une variation de l'estimation d'entrée x à partir d'une fonction modèle. Il peut parfois être plus judicieux de déterminer la variation de l'estimation de sortie y en raison de la variation de x à partir d'une expérience.

$$c = \frac{\partial y}{\partial x} \quad (\text{A.7})$$

A.4 Détermination de l'incertitude type composée

L'incertitude type composée permet de collecter un certain nombre d'incertitudes individuelles dans un nombre simple. L'incertitude type composée repose sur l'indépendance statistique des incertitudes individuelles. Elle est calculée en prenant la racine carrée de la somme de toutes les incertitudes types obtenues par l'évaluation de Type A et l'évaluation de Type B.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)} \quad (\text{A.8})$$

où

i est le nombre actuel de contributions individuelles;

$u_i(y)$ sont les contributions d'incertitude type;