

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Fibre optic sensors –

Part 3-2: Acoustic sensing and vibration measurement – Distributed sensing

Capteurs fibroniques –

Partie 3-2: Détection acoustique et mesure des vibrations – Détections réparties



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2022 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 Secretariat
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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 300 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 19 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

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.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 300 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 19 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Fibre optic sensors –

Part 3-2: Acoustic sensing and vibration measurement – Distributed sensing

Capteurs fibroniques –

Partie 3-2: Détection acoustique et mesure des vibrations – Détections réparties

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 33.180.99

ISBN 978-2-8322-1093-1

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

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms, definitions, abbreviated terms and symbols.....	8
3.1 Terms and definitions.....	8
3.2 Abbreviated terms.....	11
3.3 Symbols.....	12
4 Performance parameters of a distributed acoustic sensing system	13
5 Test apparatuses for performance parameter determination	13
5.1 Simulated fibre sensor (SFS)	13
5.2 Fibre stretcher	14
5.3 Signal generation and amplification instrumentation.....	15
5.4 Optical attenuator	15
5.5 Isolation chamber	15
6 Test procedures of performance parameters.....	16
6.1 General.....	16
6.2 Dynamic range.....	16
6.2.1 General	16
6.2.2 Set-up	16
6.2.3 Stimulus	16
6.2.4 Data collection and processing.....	17
6.2.5 Data reporting.....	19
6.3 Frequency response	19
6.3.1 General	19
6.3.2 Set-up	19
6.3.3 Stimulus	20
6.3.4 Data collection and processing	20
6.3.5 Data reporting.....	21
6.4 Fidelity.....	23
6.4.1 General	23
6.4.2 Set-up	23
6.4.3 Stimulus	23
6.4.4 Data collection and processing	24
6.4.5 Data reporting.....	24
6.5 Self-noise	24
6.5.1 General	24
6.5.2 Set-up	24
6.5.3 Stimulus	25
6.5.4 Data collection and processing	25
6.5.5 Data reporting.....	28
6.6 Spatial resolution	28
6.6.1 General	28
6.6.2 Set-up	29
6.6.3 Stimulus	29
6.6.4 Data collection and processing	29

6.6.5	Data reporting.....	30
6.7	Crosstalk	32
6.7.1	General	32
6.7.2	Set-up	32
6.7.3	Stimulus	32
6.7.4	Data collection and processing	32
6.7.5	Data reporting.....	33
6.8	Loss budget	33
6.8.1	General	33
6.8.2	Set-up	34
6.8.3	Stimulus	34
6.8.4	Data collection and processing	34
6.8.5	Data reporting.....	34
6.9	Sensor reflection robustness.....	35
6.9.1	General	35
6.9.2	Set-up	35
6.9.3	Stimulus	37
6.9.4	Data collection, processing, and reporting	38
Annex A (informative)	Conversion of optical phase measurement to strain.....	39
Annex B (normative)	Requirements for low uncertainty measurement	42
B.1	Single tone stimulus testing	42
B.2	Frequency response testing	43
Annex C (informative)	FFT window functions	45
C.1	Flat top window used for frequency domain measurements of spectral peaks	45
C.2	Window functions used for frequency domain noise measurements	46
Bibliography.....		49
Figure 1 – Distributed acoustic sensing system.....		9
Figure 2 – Signal parameters relating to time series and their spatial point identification		12
Figure 3 – Simulated fibre sensor		14
Figure 4 – Configuration for SFS showing the locations TP ₁ , TP ₂ , and TP ₃		14
Figure 5 – Test set-up for dynamic range test		16
Figure 6 – Example of a strain stimulus signal and recovered phase of IU response with a limit at 17 s		18
Figure 7 – Example of a zoom view of strain stimulus signal and recovered phase of IU response showing a phase jump at 16,98 s.....		19
Figure 8 – Test set-up for frequency response test		20
Figure 9 – Magnitude response showing the 40 stimulus signals all with magnitude.....		21
Figure 10 – Interrogator response to test stimulus, scaled in strain units, shown in the frequency domain		22
Figure 11 – Interrogator normalized frequency response.....		23
Figure 12 – Test set-up for fidelity test.....		23
Figure 13 – Test set-up for self-noise.....		25
Figure 14 – 2D data field representing the time varying acoustic field as a function of distance		26
Figure 15 – System noise floor data processing schematic		27
Figure 16 – Example plot of self-noise data		28

Figure 17 – Test set-up for spatial resolution test.....	29
Figure 18 – Spatial sample points to be used for spatial resolution evaluation	30
Figure 19 – Graphical plotting approach used to determine spatial resolution	31
Figure 20 – Test set-up for crosstalk measurement.....	32
Figure 21 – Highlighted points to be sampled for crosstalk test.....	33
Figure 22 – Example plot for crosstalk test results	33
Figure 23 – Test set-up for loss budget test	34
Figure 24 – Test configurations for sensor reflection robustness	36
Figure 25 – Fabrication examples for creating partial reflections	37
Figure B.1 – Fibre stretcher spatial sample points.....	42
Figure B.2 – Frequency domain plot of single tone stimulus.....	43
Figure B.3 – Frequency response plot of single tone stimulus	44
Figure C.1 – Flat-top window and its Fourier transform characteristics [4].....	45
Figure C.2 – Blackman-Harris window and its Fourier transform characteristics [5]	46
Figure C.3 – Hamming window and its Fourier transform characteristics [6]	47
Table A.1 – Optical phase and strain relationships.....	41

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61757-3-2:2022

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

FIBRE OPTIC SENSORS –

**Part 3-2: Acoustic sensing and vibration measurement –
Distributed sensing**

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.

IEC 61757-3-2 has been prepared by subcommittee SC 86C: Fibre optic systems and active devices, of IEC technical committee TC 86: Fibre optics. It is an International Standard.

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

Draft	Report on voting
86C/1700/CDV	86C/1719/RVD

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

The language used for the development of this International Standard is English.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement, available at www.iec.ch/members_experts/refdocs. The main document types developed by IEC are described in greater detail at www.iec.ch/standardsdev/publications.

A list of all parts in the IEC 61757 series, published under the general title *Fibre optic sensors*, 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 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 document indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61757-3-2:2022

INTRODUCTION

This document is based on SEAFOM Measuring Sensor Performance Document – 02 (SEAFOM MSP-02) [1]¹. Within the framework of a type C liaison, SEAFOM proposed this document as a new work item, which was approved by the participating members of IEC SC 86C.

NOTE Except for Figure 1, Figure C.1, Figure C.2, and Figure C.3, all figures in this document were adopted from SEAFOM MSP-02 either in original or in modified form with permission from SEAFOM.

The IEC 61757 series is published with the following logic: the sub-parts are numbered as IEC 61757-M-T, where M denotes the measure and T, the technology.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61757-3-2:2022

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

FIBRE OPTIC SENSORS –

Part 3-2: Acoustic sensing and vibration measurement – Distributed sensing

1 Scope

This part of IEC 61757 specifies the terminology, characteristic performance parameters, related test and calculation methods, as well as specific test equipment for interrogation units used in distributed fibre optic acoustic sensing and vibration measurement systems. This document refers to the Rayleigh backscatter and phase detection method by phase-sensitive coherent optical time-domain reflectometry (ϕ -OTDR) only. Quasi-static and low frequency operation modes are not covered by this document.

Generic specifications for fibre optic sensors are defined in IEC 61757

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 61757:2018, *Fibre optic sensors – Generic specification*

IEC 61757-2-2:2016, *Fibre optic sensors – Part 2-2: Temperature measurement – Distributed sensing*

3 Terms, definitions, abbreviated terms and symbols

3.1 Terms and definitions

For the purposes of this document, terms and definitions given in IEC 61757, IEC 61757-2-2:2016 and the following apply.

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

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

3.1.1

distributed fibre optic sensor

fibre optic sensor that provides a spatially resolved measurement of a measurand over an extended region by means of a continuous sensing element

[SOURCE: IEC 61757:2018, 3.5]

3.1.2

distributed fibre optic acoustic sensing system

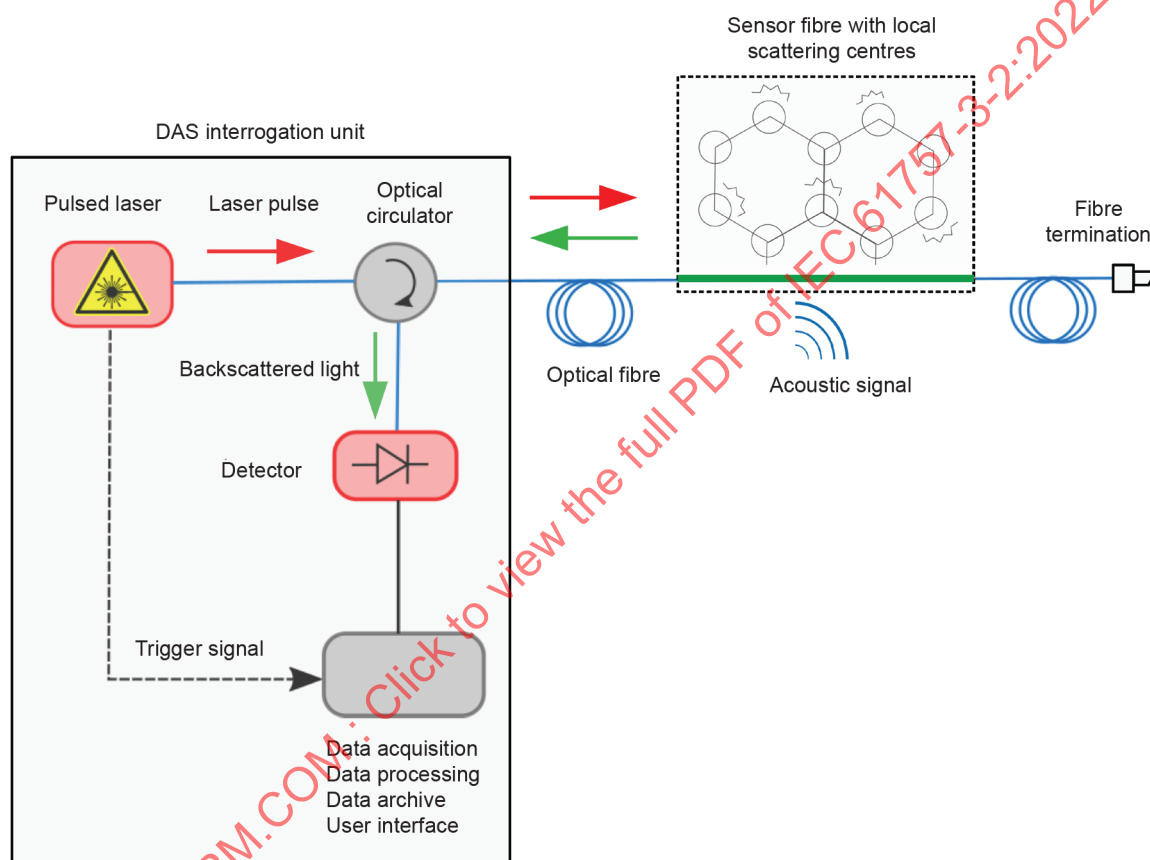
DAS

measurement set-up consisting of a distributed fibre optic sensor connected to an interrogation unit including processor, data archive, and user interface, which can locally detect acoustic or vibration induced disturbances (phase change of the backscattering centres) in the fibre

Note 1 to entry: The alternative term fibre optic distributed vibration sensing (DVS) is also used in the industry.

Note 2 to entry: See Figure 1 for a principal DAS set-up. Pulses from a coherent source are sent into the sensor fibre through an optical circulator, which also taps the coherent Rayleigh backscattering signal to a detector for subsequent digitization and fast real-time acquisition.

Note 3 to entry: Typically, a DAS detects acoustic or vibration induced disturbances at frequencies below 2 kHz.



IEC

Figure 1 – Distributed acoustic sensing system

3.1.3

distance measurement range

maximum distance (specified in length units) from the interrogation unit output connector along the simulated fibre sensor within which the DAS measures an acoustic signal with specified measurement performance under defined conditions

[SOURCE: IEC 61757-2-2:2016, 3.2, modified – adapted to acoustic sensing.]

3.1.4

fibre stretcher

device where an external stimulus causes a linearly proportional amount of fibre strain uniformly across the fibre length attached

Note 1 to entry: Normally the fibre stretcher consists of a piezoelectric cylinder with an electrical stimulus.

3.1.5

interrogation unit

IU

opto-electronic instrument that is connected to the distributed fibre optic sensor and measures and records dynamic strain along the fibre

Note 1 to entry: The processor, data archive, and user interface could be combined within the IU or could be a separate unit connected to the IU. The IU provides processing functions (standardized or customized), data archiving (usually standardized), and provides an interface to control and "set" the interrogation unit, select processing options, and define and implement the data collection options (triggered, timed, or other).

3.1.6

location

optical distance (expressed in length units) from the interrogation unit output connector to a desired sample point in the simulated fibre sensor

[SOURCE: IEC 61757-2-2:2016, 3.7, modified – adapted to simulated fibre sensor.]

3.1.7

measurement time

time between independent acoustic signal measurements when making successive measurements along the simulated fibre sensor

Note 1 to entry: Equivalently, it is the time interval between successive trace timestamps under these conditions (see Figure 2).

Note 2 to entry: The interrogation rate (specified in Hz) is equivalent to the pulse rate for interrogation units that provide optical pulse interrogation. It is equal to the inverse of the measurement time (see Figure 2).

[SOURCE: IEC 61757-2-2:2016, 3.8, modified – adapted to acoustic sensing.]

3.1.8

Nyquist frequency

frequency represented by the time duration or period of half of the interrogation or sample rate, whichever is smaller

EXAMPLE For an interrogation rate of 20 kHz (20 000 samples per second), the Nyquist frequency is 10 kHz.

3.1.9

power spectrum density

PSD

square root of the power spectral density derived from time series data converted to the frequency domain data

3.1.10

sample number

sequence number of a sample in a time series

3.1.11

sample rate

rate at which raw acoustic data is output from the interrogation unit

Note 1 to entry: The maximum sample rate is equal to the interrogation rate. Sample rate applies when the interrogation rate is reduced (by decimation or otherwise) prior to being output by the interrogation unit.

3.1.12

sample point number

successively numbered spatial sample point that increases along the length of the sensor

Note 1 to entry: The first spatial sampling point starts at zero.

3.1.13**spatial resolution**

mean value of the spatial sample intervals which are within the range of the increasing and/or decreasing slope of a step response generated by a locally abrupt change of the stimulus signal, expressed in length units

Note 1 to entry: The manufacturer of the interrogation unit designs and/or implements by hardware and/or software the spatial resolution, which may be controlled by the user.

Note 2 to entry: Figure 19 shows the graphical plotting approach used to determine spatial resolution.

3.1.14**spatial sample spacing**

distance (expressed in length units) between two consecutive sample points in a single acoustic signal

[SOURCE: IEC 61757-2-2:2016, 3.11, modified – adapted to acoustic sensing.]

3.1.15**spatial sample point****SSP**

one of the points along the simulated fibre sensor that are defined through the interrogation unit configuration or set-up and represented spatially along the fibre as uniformly spaced points from which the interrogation unit samples the backscattered light

3.1.16**strain sensitivity**

$\varepsilon_{\text{sens}}$

noise floor of the DAS defined as a strain:

$$\varepsilon_{\text{sens}} = \frac{\lambda d\phi}{4\pi n G \xi} \quad (1)$$

where

λ is the operational optical (vacuum) wavelength of the DAS;

n is the refractive index of the sensing fibre (group index);

G is the spatial resolution employed by the DAS;

ξ is the photo-elastic scaling factor for longitudinal strain in isotropic material (= 0,78);

$d\phi$ is the noise floor of the system in radians.

3.1.17**time series**

data set for a particular sample point, which is represented as sampled at the interrogation rate

Note 1 to entry: Time series can also be represented at a sub-sample rate of the interrogation rate. Whichever rate is used, it shall be used for all tests described in this document.

Note 2 to entry: Figure 2 illustrates the signal parameters relating to time series and their spatial point identification.

3.2 Abbreviated terms

CL crosstalk level

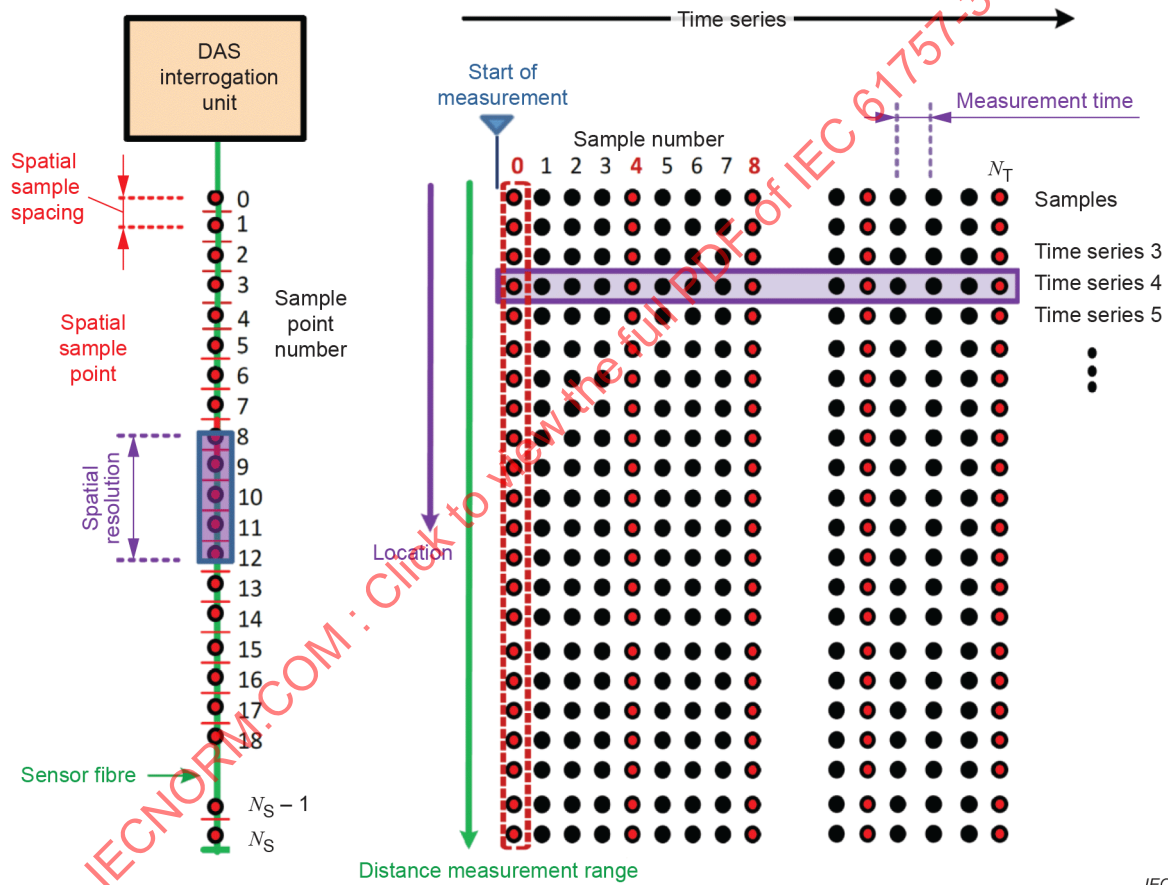
DAS distributed fibre optic acoustic sensing system

FBG fibre Bragg grating

FFT fast Fourier transform

IU interrogation unit

OTDR	optical time-domain reflectometry
PR	partial reflector
PSD	power spectral density
RL	reference level
SEC	section
SFS	simulated fibre sensor
SNR	signal-to-noise ratio
SR	signal response
SSP	spatial sample point
TP	test point



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure 2 – Signal parameters relating to time series and their spatial point identification

3.3 Symbols

L_S	fibre stretcher length
$L_{F,tot}$	total fibre length
L_L, L_R	length of left respectively right downward sloping line
M, M_C, M_{CN}	magnitude, compensated magnitude, compensated and normalized magnitude
P	normalization factor

THD_{FT}	total harmonic distortion
$\mu\epsilon$	technical unit for linear strain with a ratio of increase in length Δl to the length l_0 in the order of 10^{-6}

4 Performance parameters of a distributed acoustic sensing system

The technical performance of a DAS shall be characterized by the following performance parameters. Clause 6 describes the related test procedures to determine the parameters:

- dynamic range (see 6.2);
- frequency response (see 6.3);
- fidelity [optional] (see 6.4);
- self-noise (see 6.5);
- spatial resolution (see 6.6);
- crosstalk (see 6.7);
- loss budget (see 6.8);
- sensor reflection robustness (see 6.9).

5 Test apparatus for performance parameter determination

5.1 Simulated fibre sensor (SFS)

Each of the performance parameters shall be evaluated using a simulated fibre sensor (SFS) of an appropriate total fibre length ($L_{F,tot}$) connected to each item of IU equipment under test.

The SFS shall be arranged as shown in Figure 3. It functionally shall comprise four delay coils and three fibre stretchers that are spliced together to represent a contiguous length which is $L_{F,tot}$. In this depiction, they are all shown with optical fibre pigtails that are angle terminated with a connector type of choice at the start and end of $L_{F,tot}$. The end of $L_{F,tot}$ should have a return loss of > 50 dB.

All elements of the SFS shall be housed in an isolated chamber that provides immunity to acoustics and vibration (see 5.5).

Each of the three fibre stretchers consists of a fibre of length L_s . The fibre stretchers are located between the four delay coils and represent locations for many of the performance parameter tests. These are identified by TP_1 , TP_2 , and TP_3 .

The lengths of delay coils 1 to 4 shall be determined by using the following relationships:

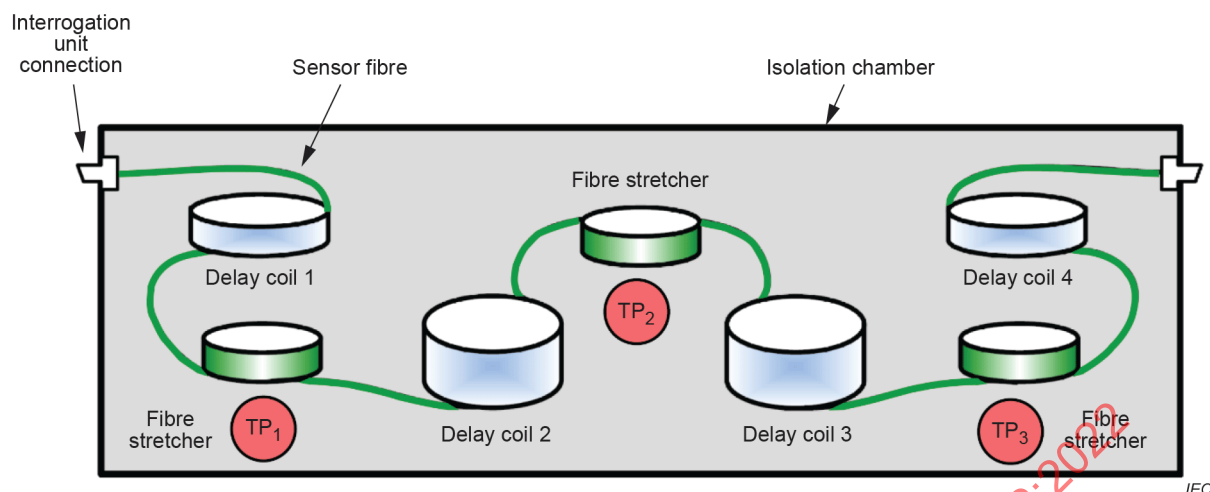
- the lengths of delay coils 1 and 4 are set to be equal to 250 m;
- the lengths of delay coils 2 and 3 are set to be equal to $L_{F,tot}' / 2$,

where

$$L_{F,tot}' = L_{F,tot} - 500 \text{ m} - 3 L_s;$$

$L_{F,tot}$ is the total fibre length;

L_s is the fibre stretcher length.



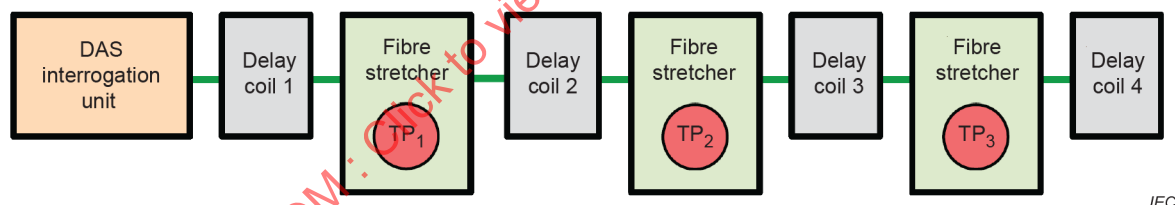
[SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1]. Reproduced with permission.]

Figure 3 – Simulated fibre sensor

The three test points in Figure 3 coincide with the centre locations of the fibre stretchers and are designated as follows:

- | | |
|--|---|
| TP ₁ : "start" location: | fibre stretcher between delay coils 1 and 2 |
| TP ₂ : "midpoint" location: | fibre stretcher between delay coils 2 and 3 |
| TP ₃ : "end" location: | fibre stretcher between delay coils 3 and 4 |

These three locations are depicted in Figure 4 and identified as TP₁, TP₂, and TP₃.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure 4 – Configuration for SFS showing the locations TP₁, TP₂, and TP₃

Individual evaluation procedures may be performed with a modified type of set-up providing the required measurement conditions. In this case, a detailed set-up description and documentation is required.

5.2 Fibre stretcher

The fibre stretcher is used for most tests of the performance parameters that require a "stimulus" in the form of a variable vibrational stretching of the fibre. Typically, it is comprised of a sensor fibre wrapped around a piezoelectric cylinder or tube actor which is radially polarized. For the fibre stretchers to be effective in conducting performance parameter testing, they should meet the following conditions:

Cylinder diameter (typical): > 5 cm (e.g. 2 in) (for low macrobend loss)

Fibre type: Same as the SFS fibre

Fibre stretcher length:	The length of fibre to be strained shall be wound on the fibre stretcher. The length (not including leads) shall be greater than twice the spatial resolution of the interrogation unit being evaluated. However, if this length does not cover at least 10 SSPs, length shall be added for such coverage. Longer lengths are acceptable.
Fibre stretch:	The stretch shall be uniform over the entire length of fibre to be strained and constant over the specified frequency range. If the frequency response is not constant, especially at higher frequencies, data compensation may be used to achieve sufficient uniformity.
Frequency range:	1 % to 80 % of Nyquist frequency
Strain levels (dynamic):	Up to (14 $\mu\epsilon$ peak)/(spatial resolution) depending on application

NOTE 1 The high strain level indicated is able to satisfy the lowest frequency for the dynamic range test. It is possible (for this particular test) that a voltage amplifier will be needed between the signal generator and the fibre stretcher. All other tests in this document involve much lower dynamic strain levels and do not need amplification.

NOTE 2 An independent fibre Bragg grating measuring system can be used to control the strain level provided by the fibre stretcher.

If an alternative construction is used instead of the piezoelectric cylinder, it shall have comparable performance parameters.

5.3 Signal generation and amplification instrumentation

A signal generator is needed to produce the drive signals for the fibre stretcher. The signal generator shall be capable of operating over the frequency response range specified in 6.3. The signal generator should produce low distortion sine waves (typically a total harmonic distortion < -54 dB) and should have low spurious outputs (typically < -60 dB) within the frequency response range.

Most fibre stretcher designs can be driven directly with commercial off-the-shelf signal generators. If amplification is needed, the amplifier shall produce sufficiently large drive voltage amplitudes to attain fibre strain levels commensurate with the stimulus requirements specified in Clause 6.

5.4 Optical attenuator

For the optical budget performance parameter testing (see Figure 22), a calibrated optical attenuator or an optical attenuator approach or attenuator that can be self-calibrated is required (see IEC 60869-1 [2] for more information).

Recommendations for a tuneable optical attenuator:

Calibrated for the operation wavelength:	Yes (or self-calibrated with a power meter)
Variable attenuation range:	2 dB to 6 dB
Attenuation setting resolution:	As needed; assumed accurate to 0,1 dB

It is also acceptable to use calibrated fixed attenuators.

5.5 Isolation chamber

The SFS uses fibre coils that are sensitive to environmental disturbances, such as room acoustics and room/benchtop vibrations. Therefore, measures shall be taken to ensure that such environmental disturbances do not degrade test data for the measurements of performance parameters.

The isolation chamber shall consist of an acoustic enclosure to provide a thermally stable and acoustically shielded experimental area. Within this enclosure, the experiment shall further be decoupled from the environment with a negative stiffness vibration isolation platform, to provide isolation from low frequency vibrations of the order of 1 Hz.

6 Test procedures of performance parameters

6.1 General

All test procedures have been developed such that a single test bed is implemented. This is defined as a simulated fibre sensor SFS (see 5.1), which shall be used for all tests. The SFS shall be isolated from room acoustics and vibration by means of an isolation chamber described in 5.5 for all tests.

Depending on the intended DAS application, appropriate stimulus test parameter values shall be used. The stimulus test parameter values listed in 6.2 to 6.9 are intended as recommendations. They should be used as much as possible to facilitate easier system comparisons.

The personnel carrying out the measurements and evaluations shall be sufficiently familiar with the fibre optic sensor technology and measurement technique.

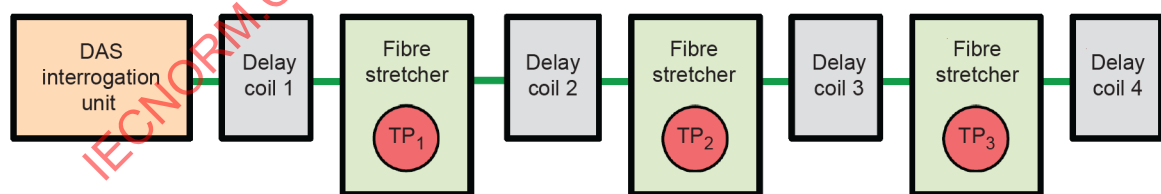
6.2 Dynamic range

6.2.1 General

The aim of a DAS is to yield a signal that is directly proportional to the amplitude of applied time-varying acoustic strain acting on the sensing fibre. The dynamic range of the system is a measure of the range of amplitudes over which the system can accurately represent the applied acoustic stimulus.

6.2.2 Set-up

The simulated fibre sensor shall be stimulated by fibre stretchers up to the maximum level of stimulation, at which the result signal is not corrupted when compared to the input stimulus. Stimulus at three different locations, TP₁, TP₂, and TP₃, along the SFS shall be applied, as shown in Figure 5.



IEC

SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure 5 – Test set-up for dynamic range test

6.2.3 Stimulus

To measure the dynamic range, the following stimulus should be used:

Signal type:	Sinusoidal
Frequencies:	1 %, 5 %, and 20 % and 80 % Nyquist frequency
Signal level (peak):	Noise floor to (π /spatial resolution/measurement time) (within the limit given by the fibre stretcher)

EXAMPLE If frequency is 1 % of Nyquist frequency, the maximum signal level range is 200π /spatial resolution.

The stimulus signal shall start at a lower signal level than the maximum expected limit and increase the level linearly with time to the past maximum expected limit. Stimulation shall be applied independently at each test position location, TP_1 , TP_2 , and TP_3 .

6.2.4 Data collection and processing

The following data shall be collected at each location TP_1 , TP_2 , and TP_3 :

Samples per location: As needed to cover stimulus range

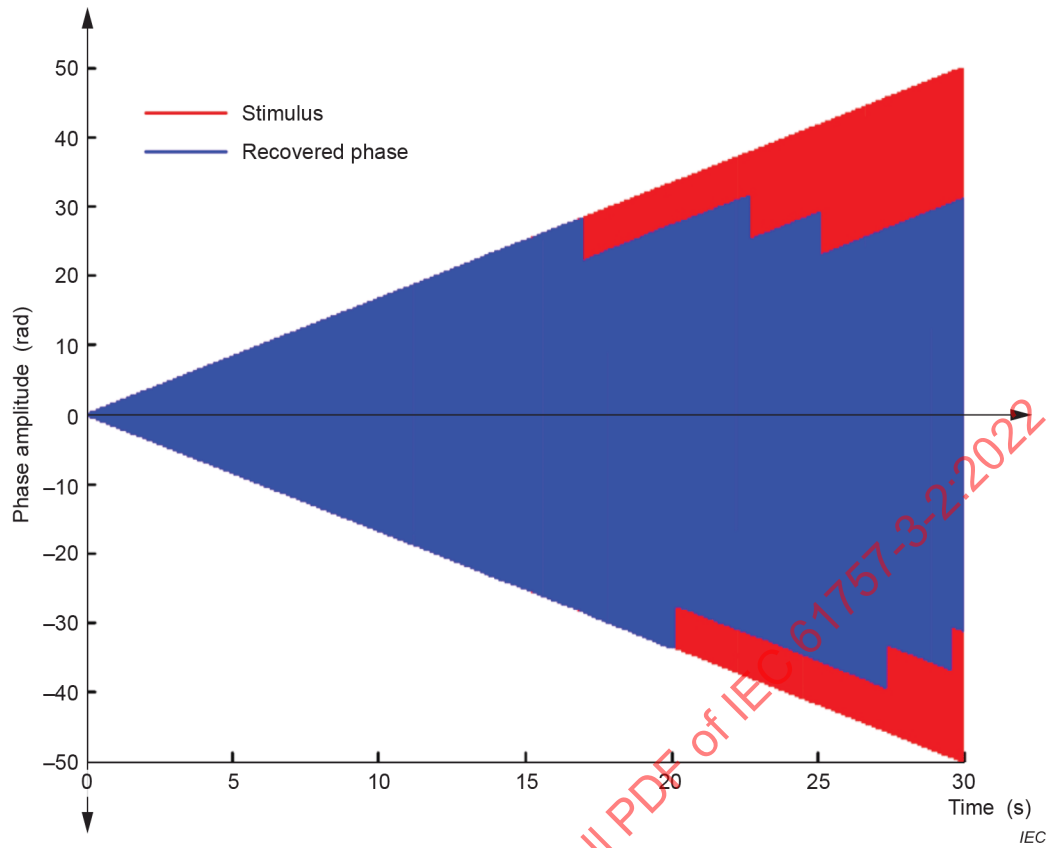
Time duration at each location: As needed to ensure low uncertainty measurement (see Annex B)

The collected data shall be processed as follows:

- a) Signal: Examination of time domain stimulus and response signal.
- b) Dynamic range limit: This limit is reached when the response signal becomes distorted or experiences its first discontinuity.
- c) The test shall be repeated 5 times. The mean value of the determined limits shall be calculated.

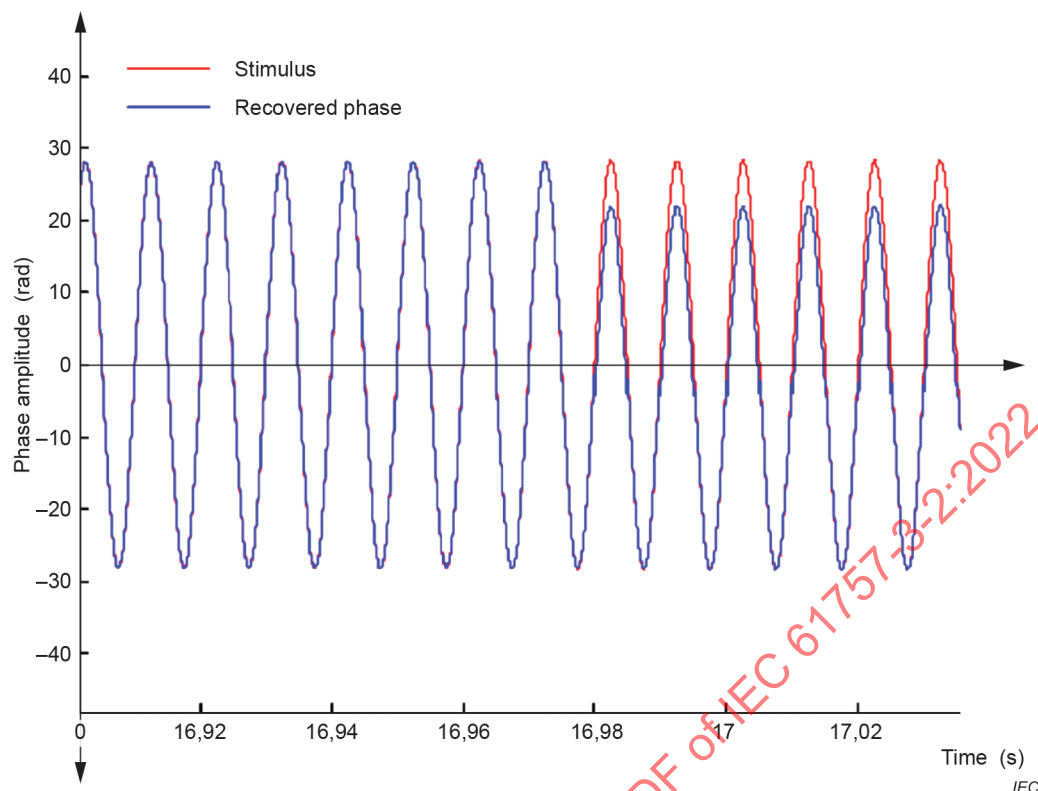
The dynamic range is equal to the amplitude of the mean stimulus signal (optical phase units converted to strain units according to Formula (A.7) in Annex A).

Figure 6 and Figure 7 illustrate signal processing. They show a simulation of an IU measurement of a 100 Hz strain stimulus signal that starts at zero amplitude and is gradually increased over a 30 s time frame. Figure 6 shows both the stimulus signal and the optical phase signal (or dynamic strain signal) measured by the IU. After approximately 17 s (corresponding to a certain strain), the IU experiences a discontinuous transition. This is shown in zoom view in Figure 7.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure 6 – Example of a strain stimulus signal and recovered phase of IU response with a limit at 17 s



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure 7 – Example of a zoom view of strain stimulus signal and recovered phase of IU response showing a phase jump at 16,98 s

6.2.5 Data reporting

The maximum peak strain attained multiplied by the spatial resolution shall be reported. This value is the strain-spatial resolution limit. This is determined for frequencies at 3 different positions (yielding a total of 12 values). A table format shall be used.

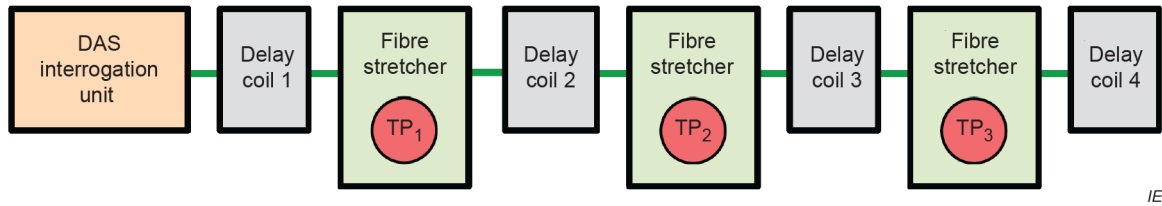
6.3 Frequency response

6.3.1 General

The frequency response test for the IU represents the accuracy of the IU to measure the sensed signals amplitude over the operational frequency range. This test only covers the magnitude and gain (gain flatness) of the frequency response.

6.3.2 Set-up

The frequency response shall be measured by stimulating the SFS over the IU functional frequency range. Measurements shall include the magnitude of the frequency response to be taken at the three locations TP_1 , TP_2 , and TP_3 as shown in Figure 8.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure 8 – Test set-up for frequency response test

6.3.3 Stimulus

To measure the frequency response the following stimulus should be used:

Signal type: Sequential tone sinusoidal sweep (40 frequency steps)

Frequencies: Interrogation rate ≤ 20 kHz: 2 % to 80 % of Nyquist frequency

Interrogation rate > 20 kHz: 200 Hz to 8 kHz

Number of frequencies: 40

Stimulus time for each frequency: 2,5 s

Sweep time for frequency range: 100 s

Signal level: 0,08 $\mu\epsilon$ (peak) / (spatial resolution) or, if needed, at lower levels to produce monotonic IU response over the frequency range.

The stimulus shall be applied to all three locations TP₁, TP₂, and TP₃ independently.

6.3.4 Data collection and processing

With the stimulus signal defined, the test approach involves the following:

- Generate the stimulus file for implementation in an arbitrary waveform generator.
- Apply the stimulus to the three test points TP₁, TP₂, and TP₃ defined in 6.3.2 and 6.3.3.
- Collect the signal response data S_R : Record sufficient samples to cover the full sweep (total number of samples N).

The time records shall be first converted to the frequency domain via Fourier transform (FFT) with no window into power spectrum density (magnitude) PSD data:

- Calculate the Fourier transform of S_R :

$$Y = \text{FFT}(S_R) \quad (2)$$

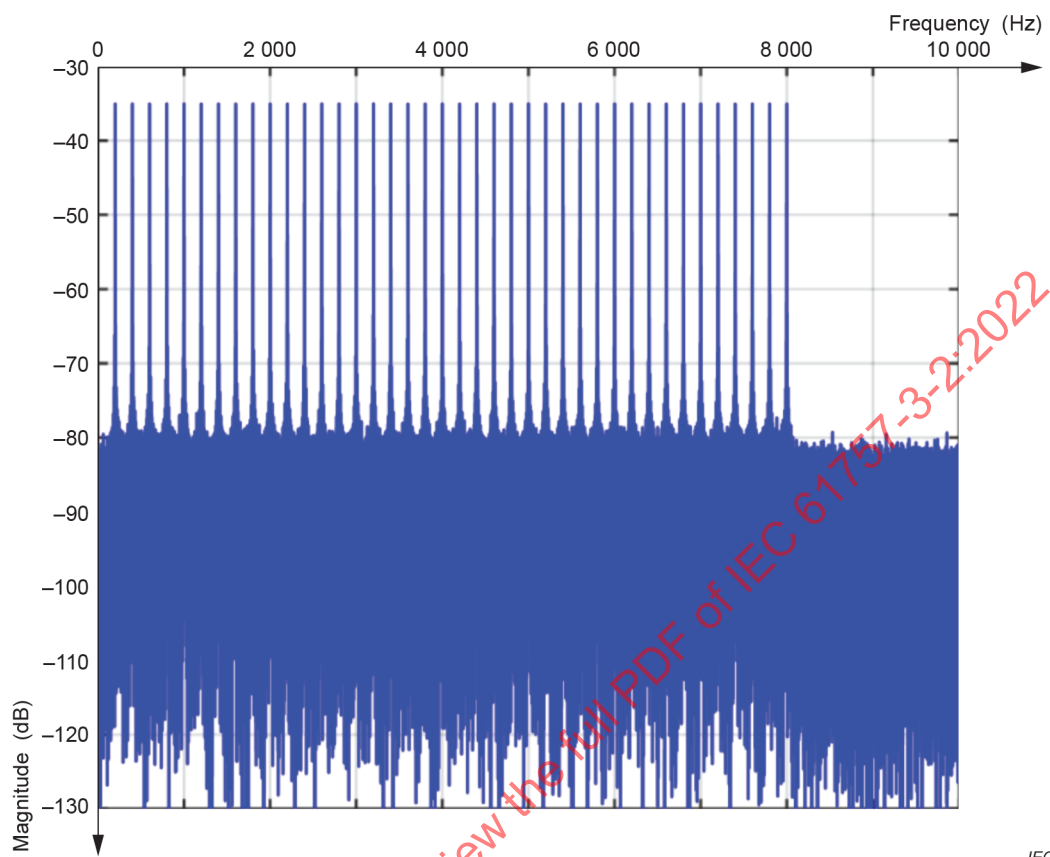
- Determine the normalization factor P :

$$P = \sqrt{N} \quad (3)$$

- Calculate the magnitude M :

$$M = P \cdot |(Y)|^2 \quad (4)$$

A typical plot of M is provided in Figure 9, where an interrogation rate of 20 kHz is used. The response covers the entire Nyquist frequency range and shows the 40 tones, with the highest being at 80 % of the Nyquist frequency.



IEC

SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

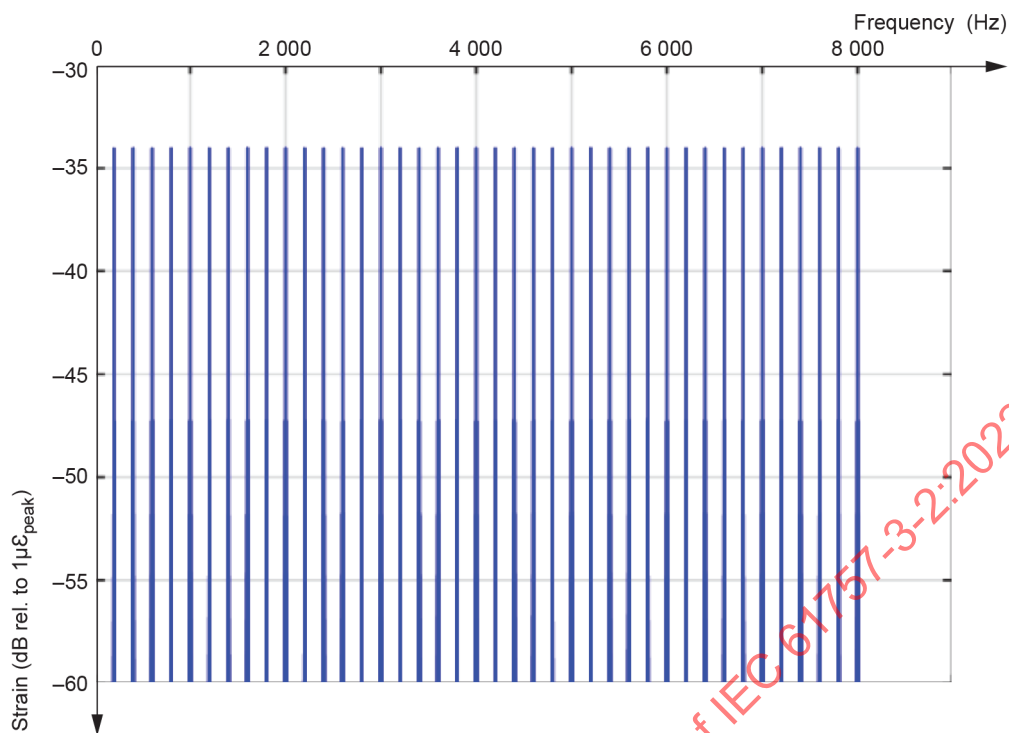
Figure 9 – Magnitude response showing the 40 stimulus signals all with magnitude

6.3.5 Data reporting

Data reporting for the frequency response test shall be a single plot which represents the magnitude response of the selected test frequencies. It shall be derived from the measured response data M and processed as follows:

- a) Generate for each of the three test points TP_1 , TP_2 , and TP_3 a graph of the interrogation unit response M to the test stimulus with the following parameters:
 - 1) Frequency range: linear from 0 Hz to Nyquist frequency.
 - 2) Amplitude scale: peak relative to strain units in dB (not strain squared).
 - 3) Amplitude range: sufficient to include indicator of the intended stimulus input.

A typical graph is shown in Figure 10.



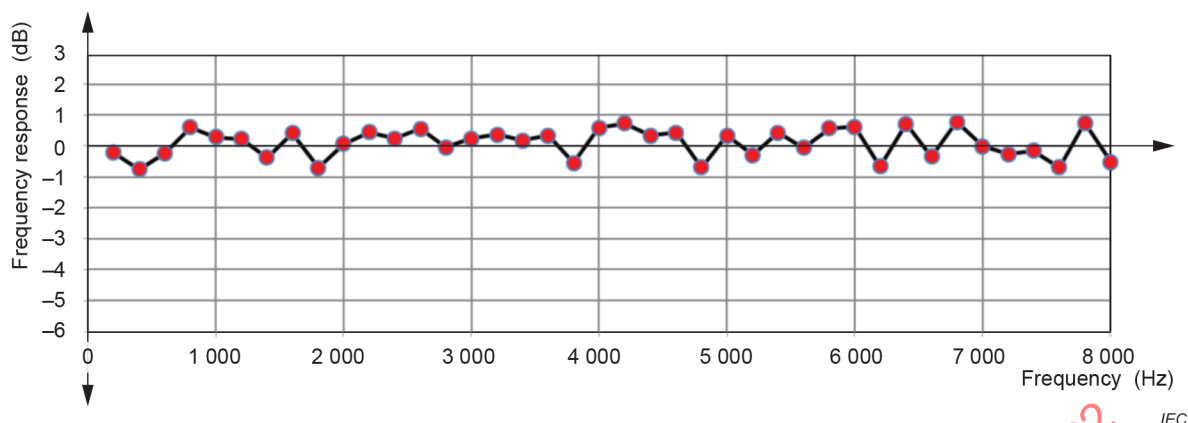
SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure 10 – Interrogation unit response to test stimulus, scaled in strain units, shown in the frequency domain

- b) Calculate for each of the three test points TP₁, TP₂, and TP₃ the corrected and normalized frequency response:
 - 1) Correct the response data M to compensate for the (magnitude) frequency response of the fibre stretcher. The result file is M_C and retains only the values of the selected test frequencies.
 - 2) Calculate the mean value of the M_C peak values corrected and normalize to that level. The result file is M_{CN} .
 - 3) Create a graph of M_{CN} with the following parameters:
 - Frequency range is linear from 0 Hz to highest frequency tested
 - Amplitude scale in dB: $(20 \cdot \log_{10}(M_{CN} \text{ value}))$
 - Amplitude range: 9 dB (+3 dB to -6 dB)

If the measured data falls outside of the specified range, then extend the range of the plot on either side to accommodate accordingly.

A typical graph is shown in Figure 11.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure 11 – Interrogation unit normalized frequency response

NOTE Piezoelectric fibre stretcher frequency response may not be perfectly flat over the frequency range test. Typically, the sensitivity increases with increased frequency as one gradually approaches the circumferential resonance. If this is the case, then the graph created in step b) accommodates correcting the data from M so that it only relates to the IU response.

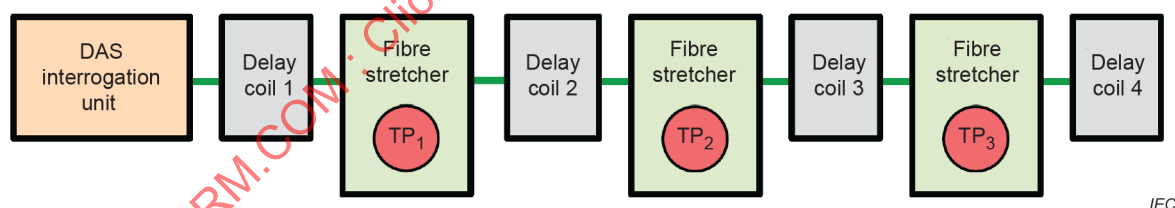
6.4 Fidelity

6.4.1 General

The fidelity test is optional and provides information about the DAS distortion or linearity behaviour.

6.4.2 Set-up

The SFS shall be stimulated with sinusoidal tones of varying level. Measurements shall be taken at the three locations TP_1 , TP_2 , and TP_3 as shown in Figure 12.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure 12 – Test set-up for fidelity test

6.4.3 Stimulus

To measure the fidelity the following stimulus should be used:

Signal type: Sinusoidal

Frequency: 10 % Nyquist frequency

NOTE If this frequency coincides with power line frequency and produces line interference, it is acceptable to change the frequency value by ± 20 %.

Signal levels (peak): (0,08 $\mu\epsilon$, 0,25 $\mu\epsilon$ and 0,8 $\mu\epsilon$) / (spatial resolution)

6.4.4 Data collection and processing

Time series data shall be collected at each of the stimulus locations. Samples at each selected SSP shall be recorded for a duration of 1 min.

The collected data shall be processed as follows:

- a) Parse the 1 min time series data records into smaller length time series, for example of 16 384 samples. The objective is to yield 10 data sets at each location.
- b) Transform the time series records via FFT magnitude with a flat-top window, discarding any data that does not meet the criteria of "low uncertainty measurement" (see Annex B).
- c) Of the remaining data, calculate the total harmonic distortion THD_{FT} in percent using harmonics 2 to 5 and averaging of 10 sets:

$$THD_{FT} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2}}{V_1} \quad (5)$$

where

V_n is the signal level (not power level) of the n -th harmonic, $n = 1$ to 5.

6.4.5 Data reporting

Total harmonic distortion THD_{FT} shall be reported in percent at each of the three levels at each of the three locations. There are 9 data values to report (expressed as a percentage). A table format shall be used.

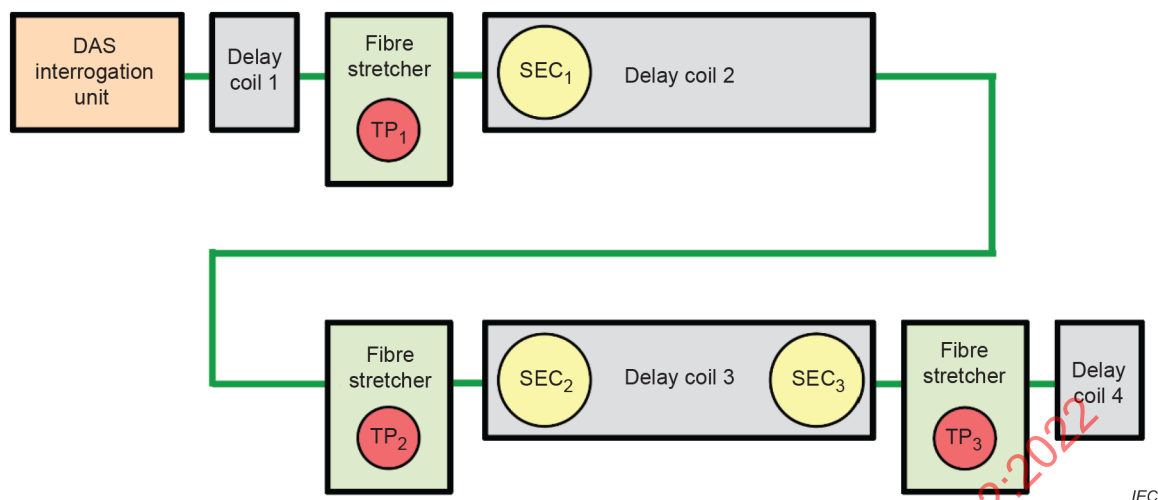
6.5 Self-noise

6.5.1 General

The purpose of this test is to evaluate the self-noise of the IU.

6.5.2 Set-up

The power spectrum density (PSD) of the noise response of the IU shall be measured at three different locations along the sensor, as shown in Figure 13, and marked as SEC_1 , SEC_2 , and SEC_3 within the two delay coils.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure 13 – Test set-up for self-noise

6.5.3 Stimulus

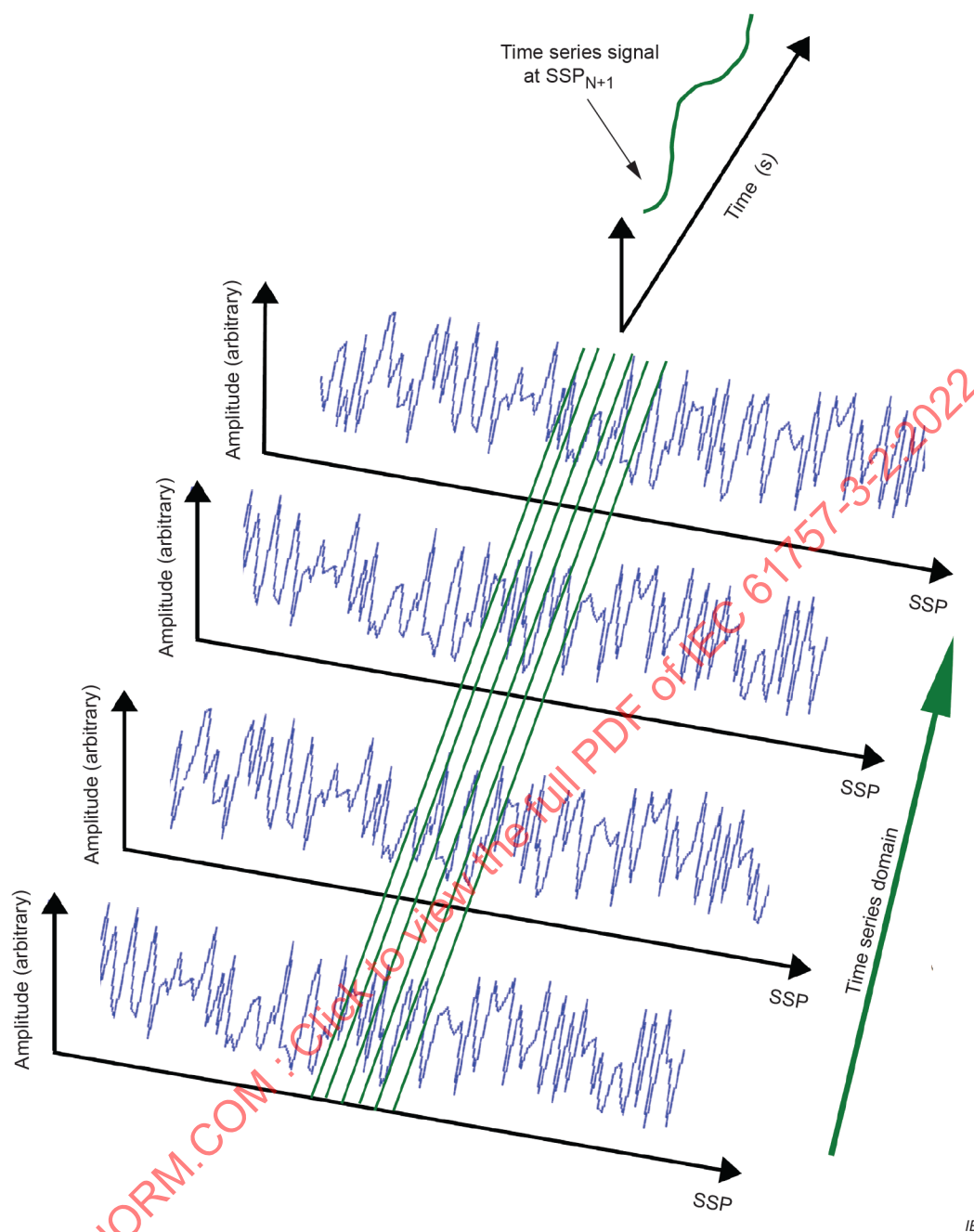
None.

6.5.4 Data collection and processing

6.5.4.1 General

The DAS shall be set up according to the manufacturer's instructions, again as appropriate for the fibre configuration with the intended interrogation parameters best suited to the SFS.

A data set of 30 s in duration shall be taken for the three sections SEC_1 , SEC_2 , and SEC_3 (300 contiguous SSPs per section are recommended). The acquired data set is a 2D field representing the time varying acoustic field as a function of distance. It is separated into two domains: the spatial domain, representing the distance along the fibre (a series of consecutive SSPs), and the time series domain, i.e. a 1D data set (time series) for each SSP with a sampling rate equal to the interrogation rate (see Figure 14).



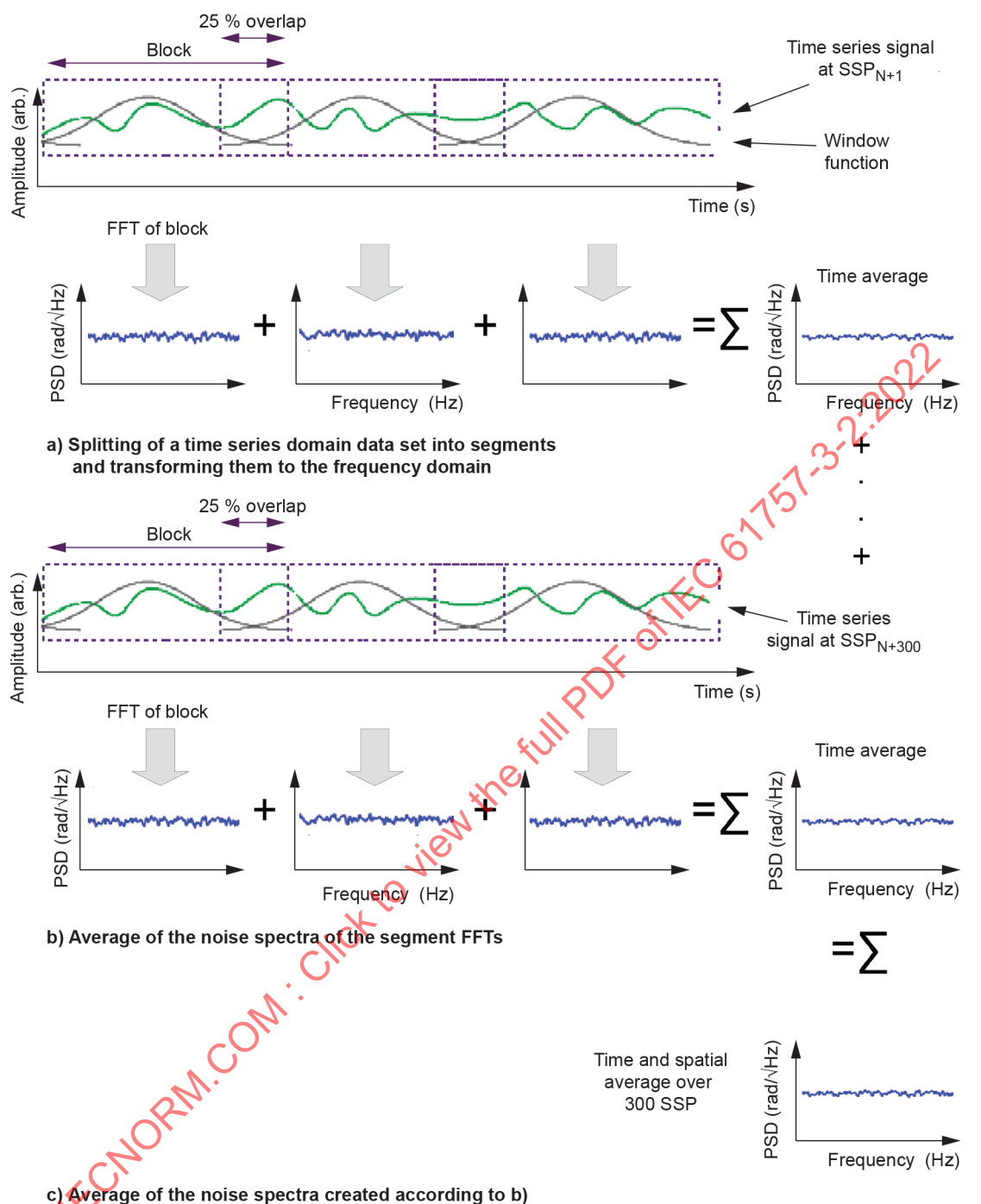
IEC

SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure 14 – 2D data field representing the time varying acoustic field as a function of distance

The data of the time series domain shall be processed as follows: Take all time series domain data sets (SSP time series) and convert each of them to the frequency domain to determine the average signal spectral density in $\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$, which shall then be converted to units of $\text{strain}/\sqrt{\text{Hz}}$.

There are two options to process the data of the time series domain. Both options are based on frequency conversion via FFT with an appropriate windowing function (see Annex C). The first option involves more computation steps (preferred by some experts) than the second option. Either option is acceptable.



IEC

SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure 15 – System noise floor data processing schematic**6.5.4.2 Multi-segment processing**

For each SSP, the time series domain data should be taken and the 30 s records split into several overlapping "blocks", each of a chosen FFT length (see Figure 15a)).

If the FFT lengths are chosen to be 1 s in duration, the noise bandwidth is automatically normalized to a 1 Hz noise band. There can be overlap between the data block if desired.

NOTE Some experts favour a 25 % overlap.

The FFT should be windowed using an appropriate windowing function (see Clause C.2). Further, the resulting frequency domain data shall be converted to magnitude and only the positive frequency data (out to the Nyquist frequency) shall be retained.

All the time series blocks within each SSP (data units of $\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$) should be averaged to determine a single noise spectrum measurement (see Figure 15b) and Figure 15c)). After averaging, the resultant data (in units of $\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$) shall be converted to strain units and normalized to the spatial resolution using Formula (A.7). The result should be three sets of 300 time series data sets (or SSPs) for each of the three sections SEC_1 , SEC_2 , and SEC_3 .

6.5.4.3 Single segment processing

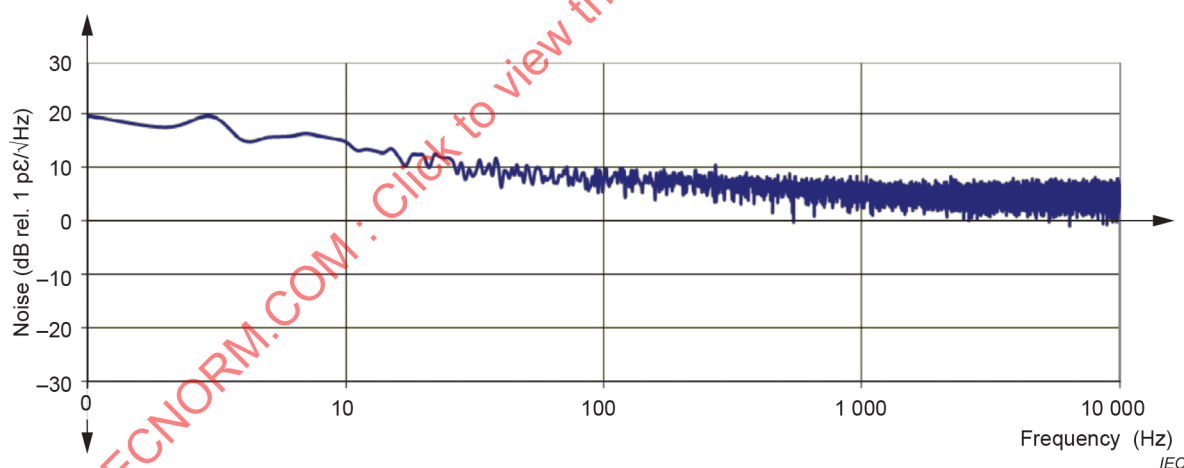
For each SSP, the FFT length should be chosen equal to the entire 30 s time series.

The FFT should be windowed using an appropriate window function (see Clause C.2). Further, the resulting frequency domain data should be converted to magnitude, normalized to a 1 Hz noise bandwidth, and only the positive frequency data (out to the Nyquist frequency) shall be retained.

Next, convert the resultant data (in units of $\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$) to strain units and normalize to the spatial resolution using Formula (A.7). The result will be three sets of 300 time series data sets (or SSPs) for each of the three sections SEC_1 , SEC_2 , and SEC_3 .

6.5.5 Data reporting

For each section, SEC_1 , SEC_2 , and SEC_3 , the self-noise data shall be plotted according to Figure 16.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure 16 – Example plot of self-noise data

The spatial resolution setting of the interrogation unit shall be reported in the test results. Frequency values shall be presented in the log scale, covering the full bandwidth of the test. Noise values shall be presented in dB (strain/ $\sqrt{\text{Hz}}$).

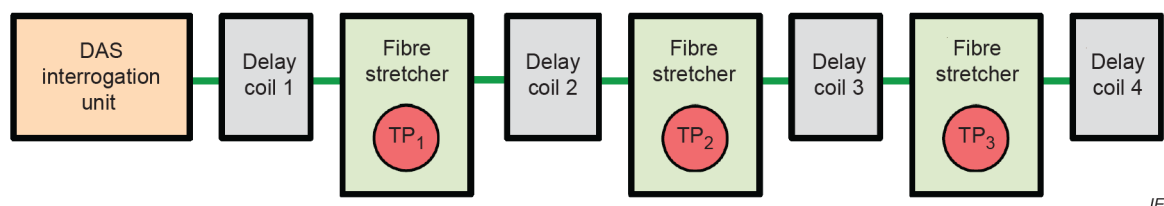
6.6 Spatial resolution

6.6.1 General

The spatial resolution measurement to be made is a check or verification of the manufacturer's specification of the IU's specified spatial resolutions, at least the smallest possible spatial resolution.

6.6.2 Set-up

Figure 17 shows the test set-up that shall be used for the spatial resolution test.



IEC

SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure 17 – Test set-up for spatial resolution test

The IU shall be connected with the SFS (see 5.1).

6.6.3 Stimulus

To measure the spatial resolution, the following stimulus should be used:

Signal type: Sinusoidal

Frequency: 2 % Nyquist frequency

NOTE If this frequency coincides with power line frequency and produces line interference, it is acceptable to change the frequency value by ± 20 %.

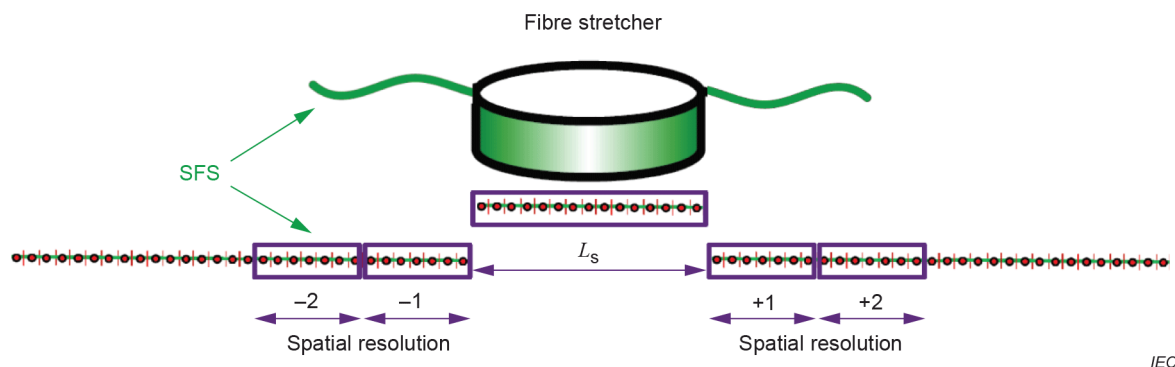
Signal level (peak): $0,5 \mu\epsilon / (\text{spatial resolution})$

The stimulus shall be applied independently to all fibre stretchers.

6.6.4 Data collection and processing

Data collection and processing shall be performed according to the following steps:

- A sinusoidal stimulus shall be applied to the fibre stretchers one after the other. The frequency of the stimulation shall be set to 100 Hz. The amplitude shall be set to $0,5 \mu\epsilon \text{ peak}/(\text{spatial resolution})$. It is not critical that this signal level be precisely $0,5 \mu\epsilon / (\text{spatial resolution})$, which is a useful level for high signal-to-noise ratio (SNR). The signal level shall be consistent for the entire test.
- Begin a time series acquisition across the entire fibre span of the sensor simulator. The duration shall be long enough to ensure that "low uncertainty measurements" (see Annex B) are collected at all the SSPs.
- Convert the IU time series data (assuming an optical phase or other "linear" measure of the IU) to the frequency domain. The time series data to be converted for the spatial resolution determination shall at a minimum cover the SSPs depicted in Figure 18.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

NOTE Each red dot represents a spatial sensor point.

Figure 18 – Spatial sample points to be used for spatial resolution evaluation

This computational approach should be performed as follows:

- 1) Time series data samples: 16 384
- 2) Window function for the data: Flat top (Clause C.1)
- 3) Frequency conversion method: FFT

Each FFT should consist of small blocks, so that numerous blocks can be processed at each SSP to eliminate the possibility that faded signals can corrupt the data. Only amplitude data should be used that exhibits a high signal-to-noise ratio (SNR) at each SSP as identified in Clause B.1.

- d) The magnitude data obtained at the stimulus frequency (100 Hz peaks) for each SSP shall be recorded. Then a graph like the one shown in Figure 19 shall be created. The graphical plotting approach shall be used to determine spatial resolution where the X axis represents SSP, and the Y axis shows the magnitude value recorded. A straight line curve fit as shown (red line) in Figure 19 shall be created. The left and right downward sloping lines are determined by the edge steepness, which results from the respective 10 % and 90 % value of the maximum signal amplitude. The middle part of the curve is determined by a linear regression line that runs parallel to the X axis and considers all amplitudes greater than 95 % of the maximum signal amplitude. The points of intersection of the three lines as well as the respective points of intersection of the left and right downward sloping lines with the X axis define the starting and end points for L_L and L_R . Figure 19 shows numerically simulated data for a spatial resolution of 5 spatial sample units. The figure shows two different data sets. The first "asymmetric data set" ADS uses a fibre stretcher which has a range of 10,5 spatial sample units and is asymmetrically situated with respect to SSPs. The second "symmetric data set" SSD uses a fibre stretcher which has a range of 11 spatial sample units and is symmetrically placed with respect to SSPs. Both data sets are calculated for 5 m spatial resolution and assume perfect performance of the IU.

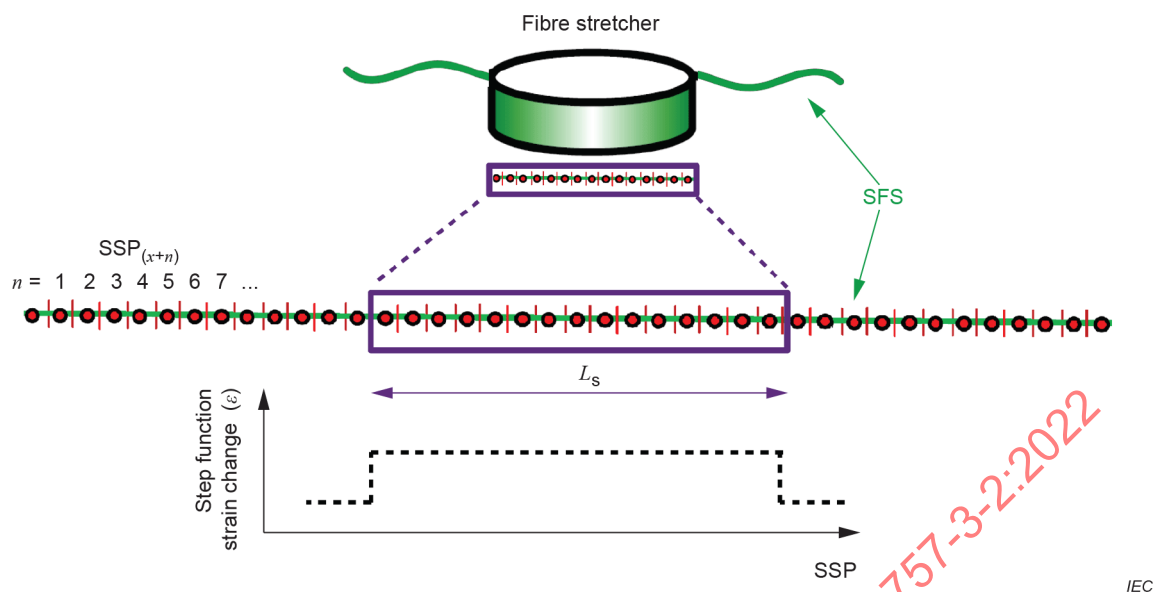
- e) The spatial resolution shall be estimated as follows:
 - 1) Measure lengths of the range of the left and right downward sloping lines and designate them as L_L and L_R .
 - 2) Spatial resolution is estimated to be $(L_L + L_R)/2$.

NOTE These units are in units of spatial sample intervals.

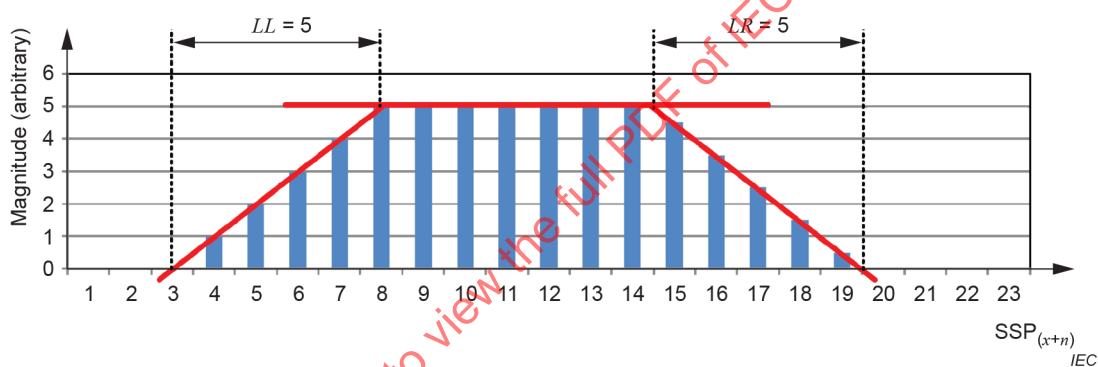
- 3) Estimated spatial resolutions shall be converted to length units.

6.6.5 Data reporting

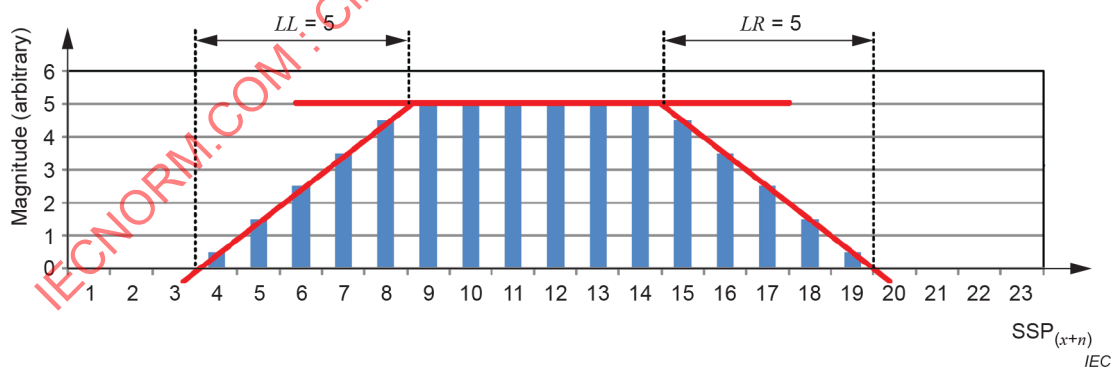
The data presented shall be a single value representing spatial resolution in metres at each of the three locations TP₁, TP₂ and TP₃.



a) Spatial sample points to be used for spatial resolution determination



b) Asymmetric data set



c) Symmetric data set

SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure 19 – Graphical plotting approach used to determine spatial resolution

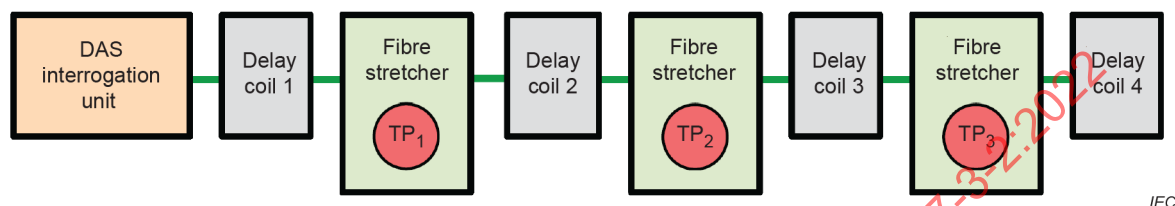
6.7 Crosstalk

6.7.1 General

Residual signals that occur in locations other than the location of the original stimulus are determined by this test.

6.7.2 Set-up

Figure 20 shows the test set-up that shall be used for the crosstalk test.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure 20 – Test set-up for crosstalk measurement

6.7.3 Stimulus

To measure the crosstalk the following stimulus should be used:

Signal type: Sinusoidal

Frequency: 2 % Nyquist frequency

NOTE If this frequency coincides with line interference, it is acceptable to change the frequency by ± 20 %.

Signal level (peak): $0,5 \mu\epsilon$ / (spatial resolution)

The stimulus shall be applied independently to all fibre stretchers.

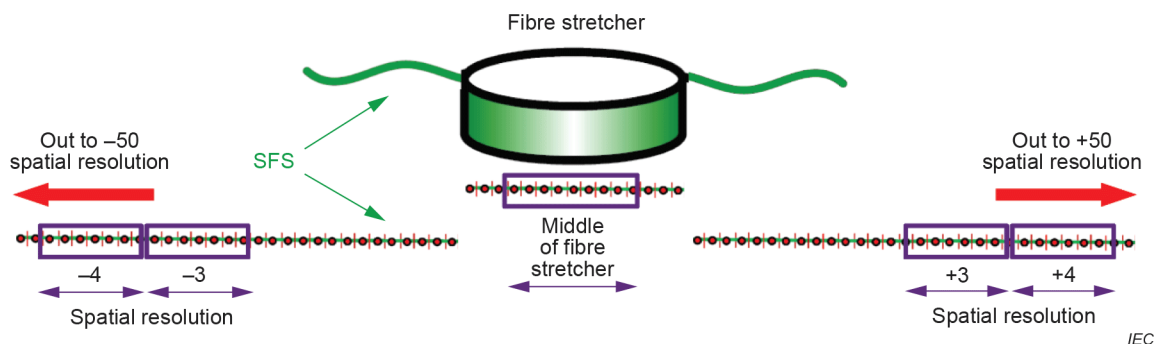
6.7.4 Data collection and processing

Data collection and processing shall be performed according to the following steps:

- 1) At first the reference level RL shall be determined by collecting time series data at the location of the fibre stretcher. The phase data from using steps a) to e) defined in 6.6.4 shall be used. The reference magnitude value shall be determined by averaging the phase data over the flat-top portion of the fibre stretcher.
- 2) Subsequently, the crosstalk level CL shall be determined by using the phase data obtained from steps a) to e) defined in 6.6.4. The magnitudes of the signals (at the stimulation frequency) shall be measured for SSPs that cover the span +3 spatial resolution to +50 spatial resolution and –3 spatial resolution to –50 spatial resolution (or minimum of ± 250 m) from the fibre stretchers (TP_1 , TP_2 and TP_3), as indicated in Figure 21.

All time series data shall be collected for 1 min.

- 3) Finally, the crosstalk ratios shall be determined. The ratio of the crosstalk magnitude to the reference magnitude for all crosstalk data shall be calculated and normalized in dB, i.e. $20 \cdot \log_{10} (CL/RL)$.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

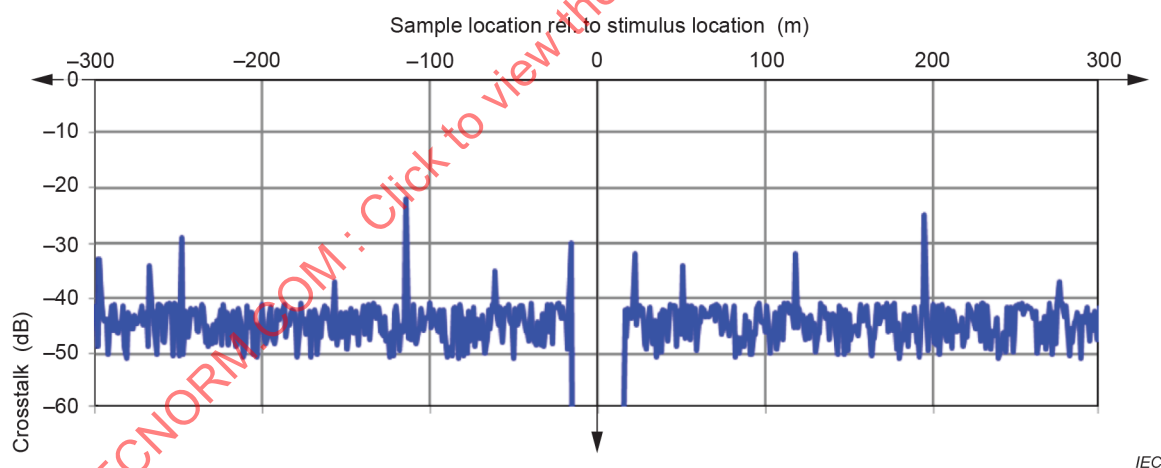
NOTE Sampled points cover spatial resolution $\pm(3$ to $50)$ as indicated by the red arrows.

Figure 21 – Highlighted points to be sampled for crosstalk test

6.7.5 Data reporting

After having performed step 3) in 6.7.4, the data over the range of ± 50 spatial resolution from each fibre stretcher (TP₁, TP₂ and TP₃) shall be plotted. The units for each plot shall be dB crosstalk versus length (m) along the simulated fibre sensor. A conversion of SSP to fibre length is required. This results in three plots, one for each location TP₁, TP₂ and TP₃.

An example plot is provided in Figure 22, which assumes 6 m spatial resolution. No data is shown for sample locations that are closer than twice the spatial resolution to the stimulus location.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

NOTE 1 Data is shown to cover ± 50 spatial resolution.

NOTE 2 Spatial resolution is 6 m.

Figure 22 – Example plot for crosstalk test results

6.8 Loss budget

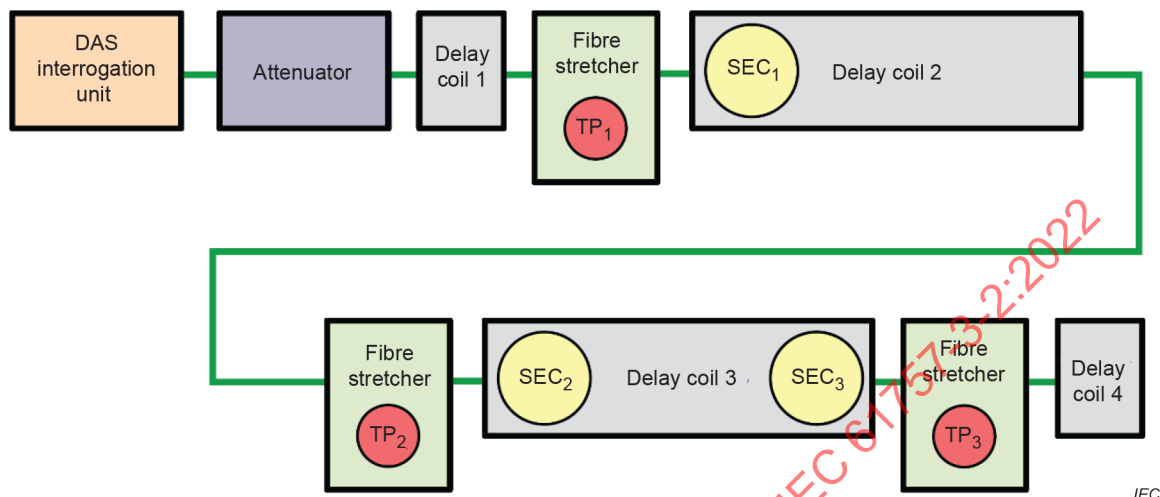
6.8.1 General

The loss budget test is intended to evaluate the IU performance for non-ideal sensor installation conditions.

NOTE The dominant consideration is that optical loss is caused at the beginning of the sensor, in the vicinity for example of the well-head exit or other proximal interfaces between the IU and the deployed sensor.

6.8.2 Set-up

An optical attenuator (as stimulus) shall be placed between the IU and the SFS input as depicted in Figure 23. An input optical attenuator and three designated test points TP₁, TP₂, and TP₃ are shown, which represent the beginning, middle and end of the SFS.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure 23 – Test set-up for loss budget test

6.8.3 Stimulus

The following attenuation settings should be used:

Reference measurement:	0 dB (reference data from 6.5, self-noise measurement)
First measurement:	2 dB
Second measurement:	4 dB
Third measurement:	6 dB

6.8.4 Data collection and processing

A self-noise measurement according to 6.5 shall be performed at the three test points identified for each of the attenuation levels. Process the data according to the self-noise measurement described in 6.5. Determine the spot frequency noise level at the 50 % Nyquist locations for all four measurements in dB strain, normalized to 1 Hz noise band.

6.8.5 Data reporting

These values shall be reported in two tables: the first table showing the noise levels for four measurements at the three locations, the second table showing the difference (in dB) of the reference measurement (no attenuation) and the three measurements at the different attenuation levels. Also, the spatial resolution used shall be cited.

6.9 Sensor reflection robustness

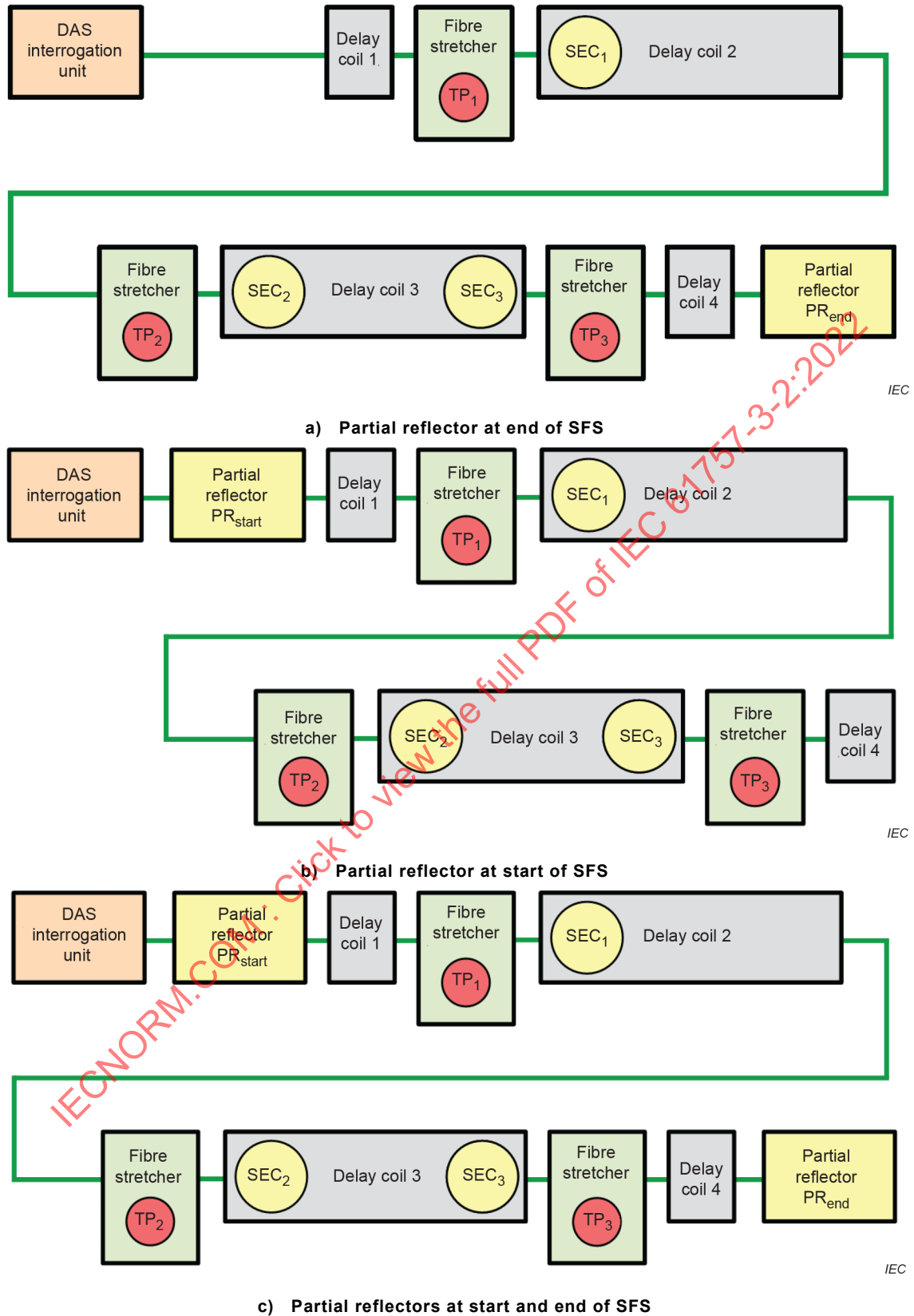
6.9.1 General

Dead zones are caused by unintended partial reflections in the installed sensor fibre where the reflections can temporarily disable the interrogation process (signal saturation). To characterize the IU robustness to such reflections, in-line partial reflectors are inserted in the SFS which simulate "sensor imperfections". Measurement considerations include both sensor end terminus and in-line reflection locations.

6.9.2 Set-up

Three separate sensor reflection scenarios shall be considered. The test involves partial reflectors (PRs) at the start, at the end, or at both ends of the SFS. The three test set-ups are shown in Figure 24. The partial reflectors shall be mated to the start and end connectors of the SFS.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61757-3-2:2022

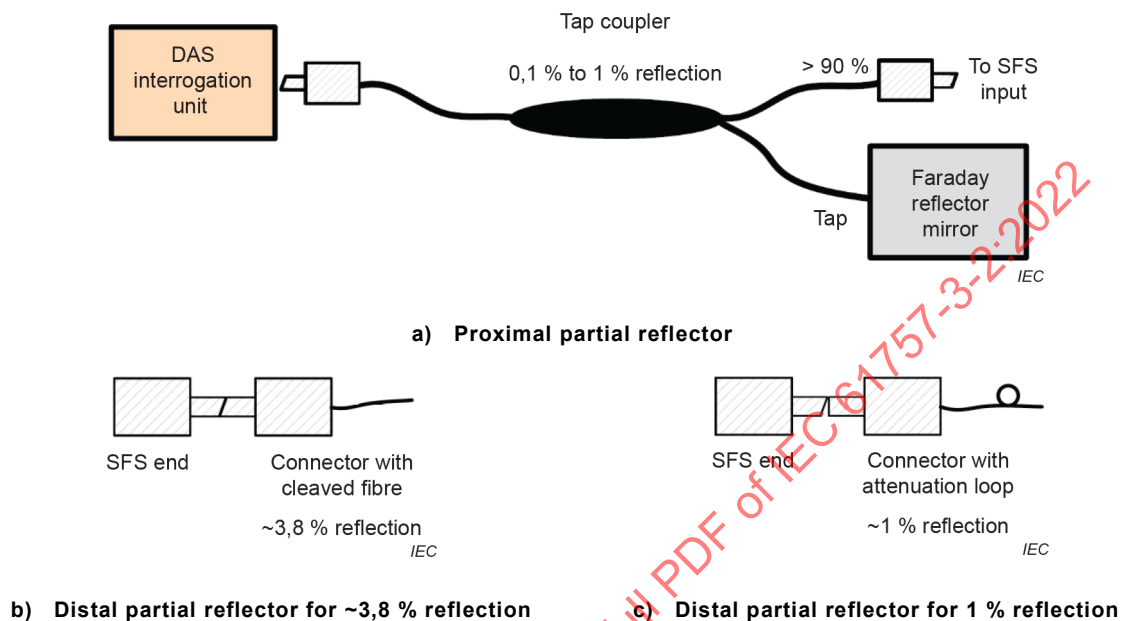


SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure 24 – Test configurations for sensor reflection robustness

PRs shall be in-line fibre elements. They shall provide known partial reflections at the wavelength(s) of operation of the IU. PR_{start} shall have 0,5 % to 1 % reflection, and PR_{end} shall have up to 3,6 % reflection.

PRs can be custom fibre Bragg gratings (FBGs) made for the desired reflectivity or other fibre assemblies. Figure 25 shows examples of other easy to fabricate partial reflectors.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure 25 – Fabrication examples for creating partial reflections

Proximal reflections can be made by using a tap coupler where most of the light passes to the sensor, and a small portion is directed to a reflector. Figure 25a) shows a Faraday reflector mirror, as these types of mirrors come with an optical fibre pigtail and are easy to implement. Any other fibre optic mirror with an optical fibre pigtail is expected to be acceptable.

Distal reflections can be made by mating connectors as shown in Figure 25 to create the desired reflection. The drawing in Figure 25b) shows two angle connectors mated to an optical fibre pigtail which is cleaved at 90°. This will provide for an approximately 3,8 % reflection. The drawing in Figure 25c) provides for approximately 1 % reflection (light which reflects from the PC connector surface (for 1 550 nm light)). The optical fibre pigtail would have a series of tight loops (for example, 10 loops with 1,27 cm (0,5 inch) diameter) to attenuate the throughput light to a negligible value.

A wider range of reflection can be achieved by using a 5 % or 10 % coupler and adding a tuneable attenuator in the form of a mirror.

6.9.3 Stimulus

Fidelity shall be tested at three test points TP_1 , TP_2 , and TP_3 at two stimulus levels of 0,25 $\mu\epsilon$ and 0,8 $\mu\epsilon$ /(spatial resolution) according to 6.4.

Self-noise tests shall be performed at three sections marked with SEC_1 , SEC_2 , and SEC_3 according to 6.5.

6.9.4 Data collection, processing, and reporting

Fidelity test data shall be collected and processed according to 6.4 and compared with results from fidelity testing from 6.4. The parameter THD_{FT} shall be presented in percentage values. Up to eighteen values are provided from the reflection configurations a), b), and c) of Figure 24 to compare with the six values from the fidelity test. The results shall be presented in table format.

Self-noise test data shall be collected and processed according to 6.5 and compared with results from self-noise testing from 6.5. Overlap plots shall be used to present and compare the test results. The reference data set shall be the self-noise measurement with no reflections. The other data set shall represent the self-noise data from tests performed according to configurations a), b), and c) of Figure 24, sections SEC₁, SEC₂, and SEC₃. Thus, 9 overlap plots are obtained after all tests are performed.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61757-3-2:2022

Annex A (informative)

Conversion of optical phase measurement to strain

Most DAS implement some methodology that relies on the determination of an optical phase displacement as the native quantity measured, relating to the fibre sensitivity.

The conversion of this optical phase measure to standard strain units requires the following:

- a) account for the Poisson ratio of the fibre (sensor);
- b) account for the "double path" nature of DAS backscatter measurements.

NOTE The sensed light is based on the folded optical path nature of the OTDR which produces an optical path length change twice that implied by the linear strain across the optical spatial resolution itself, i.e. L is twice the spatial resolution.

The following derivation provides for the appropriate conversions:

When light travels through a fibre of length L and refractive index n , the optical phase ϕ is:

$$\phi = n k L \quad (\text{A.1})$$

where

k is the wave number ($k = 2\pi/\lambda$);

λ is the vacuum wavelength.

Changes in phase (of any type) can be categorized as originating from changes from three different sources, namely length, refractive index, and wavelength, expressed as:

$$\frac{d\phi}{\phi} = \frac{dL}{L} + \frac{dn}{n} + \frac{dk}{k} \quad (\text{A.2})$$

When the fibre experiences strain ε ($= dL/L$), one could be inclined to assume that the amount of strain is directly translated to the amount of change in phase delay, as $d\phi/\phi = \varepsilon$, but this is not true, as strain also causes changes in the index of refraction n through the photo-elastic effect [3], so that it is necessary to introduce a scale factor ξ as:

$$\xi = 1 - \frac{1}{2}n^2 \left(P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12}) \right) \approx 0,78 \quad (\text{A.3})$$

where P_i is the strain optic coefficient (for silica $P_{12} = 0,27$, $P_{11} = 0,12$), which results in:

$$\frac{d\phi}{\phi} = \xi \varepsilon \quad (\text{A.4})$$

Combining Formula (A.1) and Formula (A.4) establishes a linear relationship between the strain and the resulting change in the phase delay as:

$$d\phi = \frac{2\pi n L \xi \varepsilon}{\lambda} \quad (\text{A.5})$$

Accounting for the particular measurement of the IU where L in Formula (A.5) is represented below by the double transit of a spatial resolution, the optical phase is represented as:

$$d\phi = \frac{4\pi n G \xi \varepsilon}{\lambda} \quad (\text{A.6})$$

where G is the spatial resolution of the DAS.

Formula (A.6) is rearranged to show the strain sensitivity:

$$\varepsilon_{\text{sens}} = \frac{\lambda d\phi}{4\pi n G \xi} \quad (\text{A.7})$$

where

- λ is the operational optical (vacuum) wavelength of the DAS;
- n is the refractive index of the sensing fibre (group index);
- G is the spatial resolution employed by the DAS;
- ξ is the photo-elastic scaling factor for longitudinal strain in isotropic material (= 0,78);
- $d\phi$ is the noise floor of the system in radians;
- $\varepsilon_{\text{sens}}$ is the noise floor of the system defined as a strain.

The interferometric optical phase-strain relationship from Formula (A.6) is shown in Table A.1. It provides the optical phase level required to attain stimulus strain levels in relation to the amount of optical fibre wound on the fibre stretcher. Alternatively, it provides the optical phase "accumulated" across a spatial resolution for a given strain level. Thus, Table A.1 provides a useful reference tool to determine the drive level required for fibre stretchers for the various tests within this document.

Table A.1 – Optical phase and strain relationships

Strain	0,025 $\mu\epsilon$	0,05 $\mu\epsilon$	0,1 $\mu\epsilon$	0,25 $\mu\epsilon$	0,5 $\mu\epsilon$	1 $\mu\epsilon$	2,5 $\mu\epsilon$	5 $\mu\epsilon$
fibre stretcher length	Optical phase							
m	rad							
1	0,23	0,46	0,93	2,32	4,64	9,28	23,21	46,42
2	0,46	0,93	1,86	4,64	9,28	18,57	46,42	92,84
3	0,70	1,39	2,79	6,96	13,93	27,85	69,63	139,27
4	0,93	1,86	3,71	9,28	18,57	37,14	92,84	185,69
5	1,16	2,32	4,64	11,61	23,21	46,42	116,06	232,11
6	1,39	2,79	5,57	13,93	27,85	55,71	139,27	278,53
8	1,86	3,71	7,43	18,57	37,14	74,28	185,69	371,38
10	2,32	4,64	9,28	23,21	46,42	92,84	232,11	464,22
12	2,79	5,57	11,14	27,85	55,71	111,41	278,53	557,07
15	3,48	6,96	13,93	34,82	69,63	139,27	348,17	696,34
20	4,64	9,28	18,57	46,42	92,84	185,69	464,22	928,45
25	5,80	11,61	23,21	58,03	116,06	232,11	580,28	1 160,56
30	6,96	13,93	27,85	69,63	139,27	278,53	696,34	1 392,67
35	8,12	16,25	32,50	81,24	162,48	324,96	812,39	1 624,79
40	9,28	18,57	37,14	92,84	185,69	371,38	928,45	1 856,90
45	10,45	20,89	41,78	104,45	208,90	417,80	1 044,50	2 089,01
50	11,61	23,21	46,42	116,06	232,11	464,22	1 160,56	2 321,12

SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Annex B (normative)

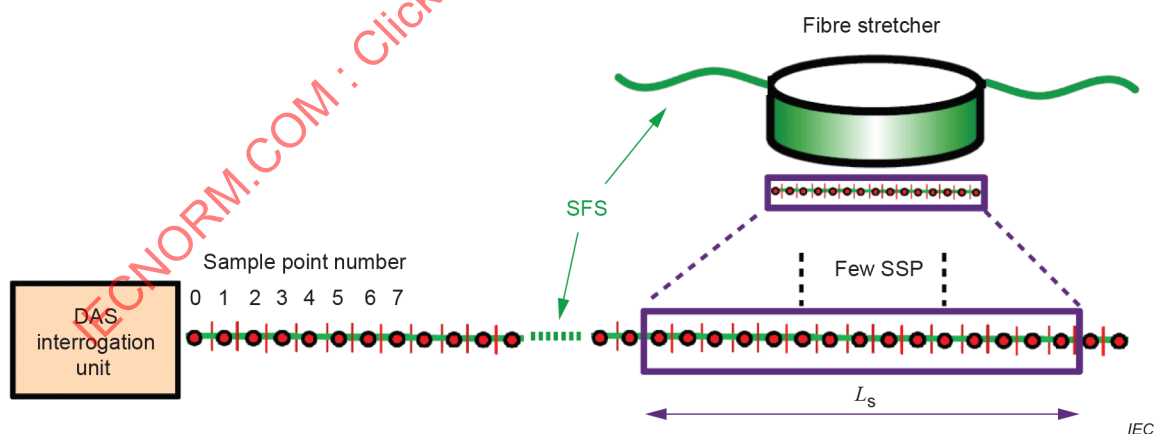
Requirements for low uncertainty measurement

B.1 Single tone stimulus testing

The measurement of dynamic range, fidelity, spatial resolution, and crosstalk require a sufficiently high signal-to-noise ratio (SNR) to make a precise measurement. Considering that DAS are influenced by Rayleigh fading statistics, where highly faded signals have less than sufficient SNR, one needs to ensure that "bad" data sets are not used.

The following process steps shall be performed to conduct low uncertainty measurements:

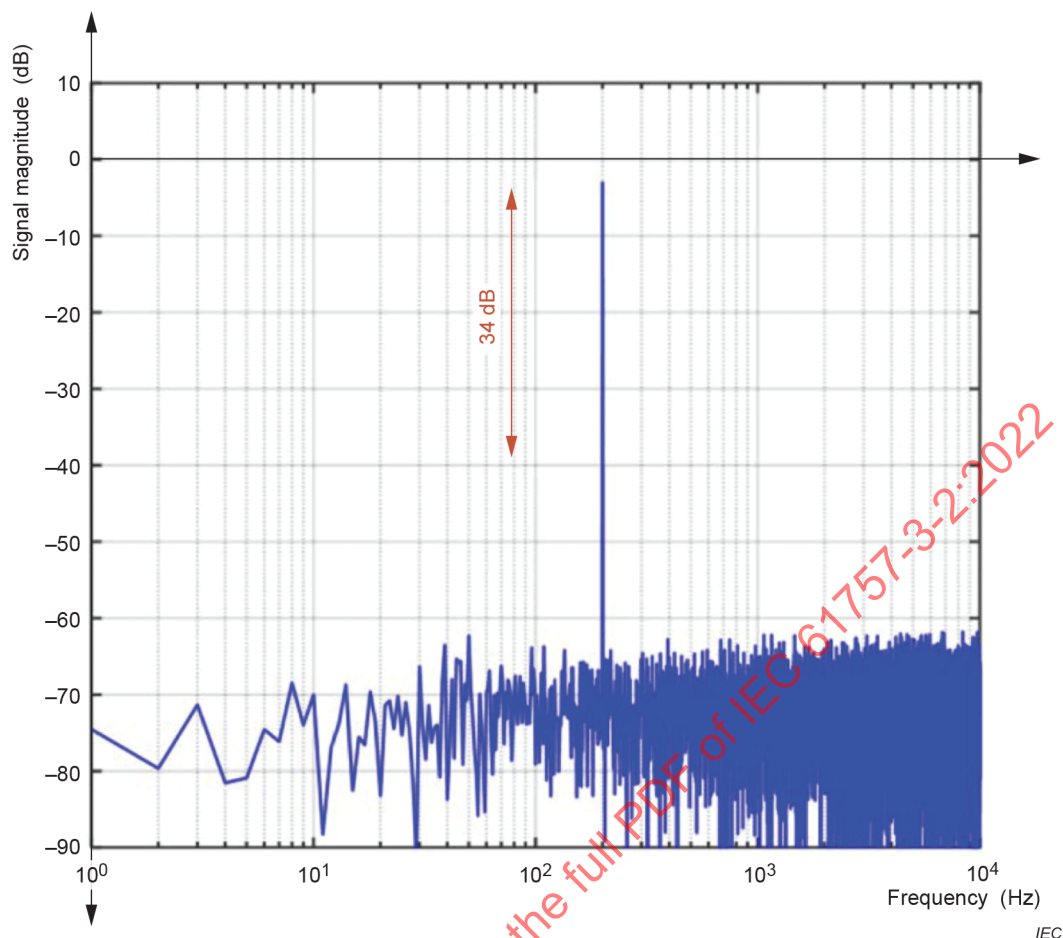
- a) Take multiple simultaneous time series data of a few SSPs covered by the fibre stretcher (close to the centre, see Figure B.1) with the single tone stimulus on. These sample points will always be available as the fibre stretcher is required to cover at least 10 spatial locations. The time duration to be recorded should be whatever the specific test calls for.
- b) Process each of these time series data by (FFT) converting to the frequency domain to examine the SNR of the stimulus as follows:
 - 1) Select one second of time series data from approximate mid-point of the time series. Only use one second (this normalizes noise bandwidth).
 - 2) Perform FFT on the one second record. The use of data windows such as Blackman-Harris is optional but not necessary.
 - 3) Plot the signal magnitude in units of dB of the frequency domain data sets (single sided) and examine the resulting graph. Evident should be the single tone signal superimposed over a noise level for the remaining frequencies. The SNR is the ratio of the magnitude of the single tone signal to the noise level.
- c) Time series data that exhibit an SNR of 50 (34 dB) or higher qualify as low uncertainty measurements. Higher SNR is better.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure B.1 – Fibre stretcher spatial sample points

An example plot for examination of data quality is shown in Figure B.2. Shown here is a large SNR (~60 dB).



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure B.2 – Frequency domain plot of single tone stimulus

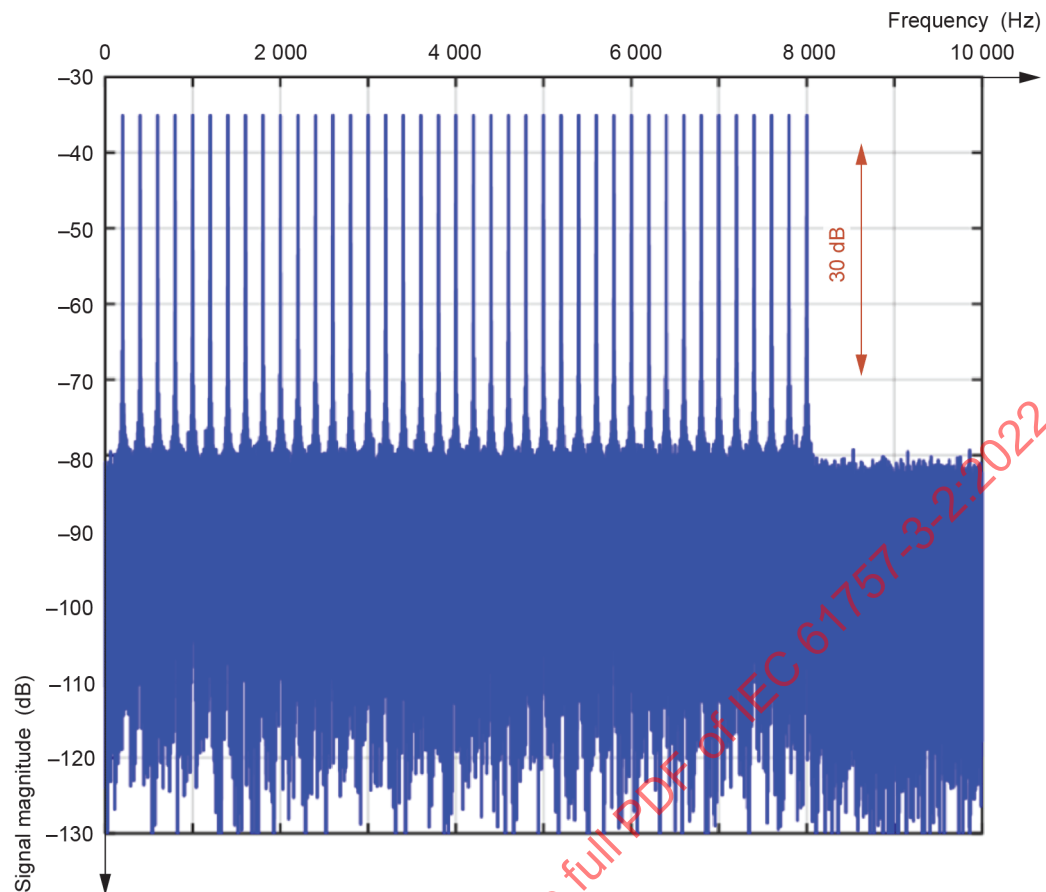
B.2 Frequency response testing

The measurement of the frequency response requires a sufficiently high SNR to make a precise measurement. Considering that DAS are influenced by Rayleigh fading statistics, where highly faded signals have less than sufficient SNR, it is necessary to ensure that "bad" data sets are not used.

The following process steps shall be performed to conduct low uncertainty measurements:

- Subclause 6.3 identifies the stimulus as a sequential tone sinusoidal sweep lasting 100 s. Take multiple simultaneous time series data at each location covered by the fibre stretcher. Ensure each time series captures the full 100 s forty-tone stimulus (increase measurement time if needed).
- Process each of these time series data (100 s frequency stepped sweep) by converting to the frequency domain via the FFT process to examine the SNR of the stimulus signal for all forty tones. The specific steps to perform this calculation are described in 6.3.
- Time series data that exhibit an SNR of 32 (30 dB) or higher qualify as low uncertainty measurements. Higher SNR is better.

An example plot for examination of data quality is shown in Figure B.3. Shown here is a large SNR (~46 dB).



IEC

SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduced with the permission of SEAFOM.

Figure B.3 – Frequency response plot of single tone stimulus

Annex C (informative)

FFT window functions

C.1 Flat-top window used for frequency domain measurements of spectral peaks

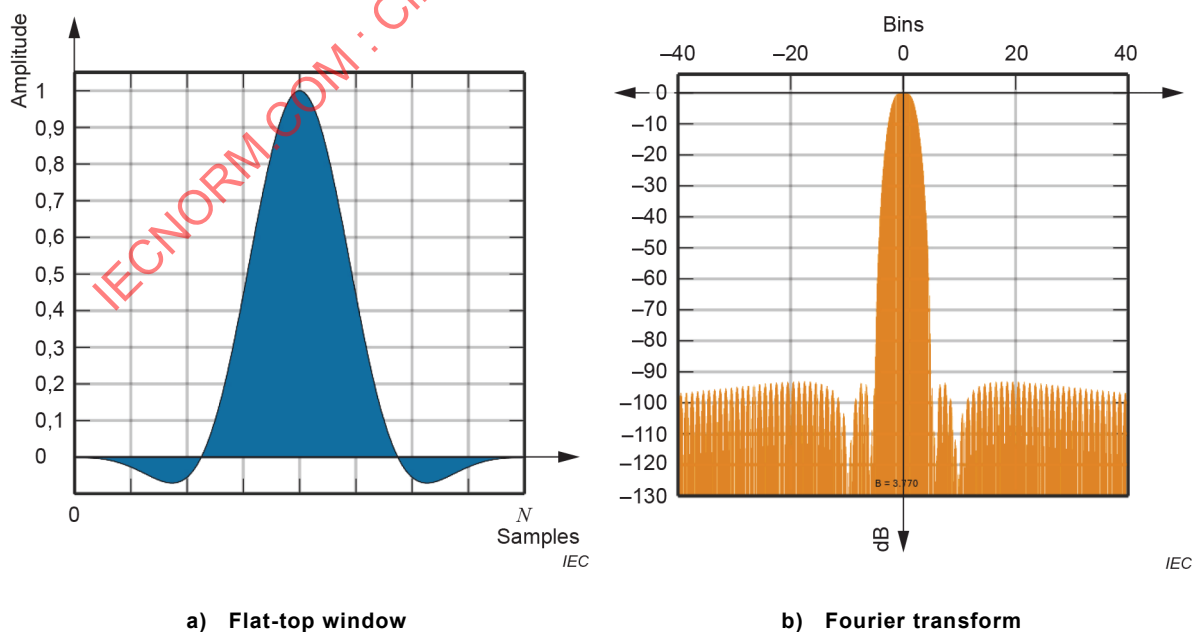
In order to make precise measures of IU response signals, the time series data from certain tests will be converted to the frequency domain via Fourier transform. Window functions should be applied to the time series data prior to some of the Fourier transforms used for the measurements of performance parameters.

The flat-top window function will be used for the following performance parameter tests:

- a) fidelity;
- b) spatial resolution;
- c) crosstalk;
- d) sensor reflection robustness.

The flat-top window has the best amplitude accuracy of all the smoothing windows at $\pm 0,02$ dB for signals exactly between integral cycles. It is principally used for calibration purposes. The broad peak produced by the flat-top window is closer to the true amplitude of the signal than with any of the other windows. The flat-top window is therefore a good choice when the top priority is to measure the signal's amplitude from the spectrum. Reference [4] shows the window function and normalized transform magnitude.

Figure C.1 depicts the characteristics of the flat-top window for a time series of N samples and the resulting Fourier transform exhibiting a broad peak across the resulting frequency bins.



SOURCE: https://en.wikipedia.org/wiki/Window_function#Flat_top_window [4].

Figure C.1 – Flat-top window and its Fourier transform characteristics

The generating function with amplitude coefficients is provided in Formula (C.1):

$$w(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{N}\right) + a_3 \cos\left(\frac{6\pi n}{N}\right) + a_4 \cos\left(\frac{8\pi n}{N}\right) \quad (\text{C.1})$$

where

n is the sample index;

N is the number of samples;

$a_0 = 1$;

$a_1 = 1,93$;

$a_2 = 1,29$;

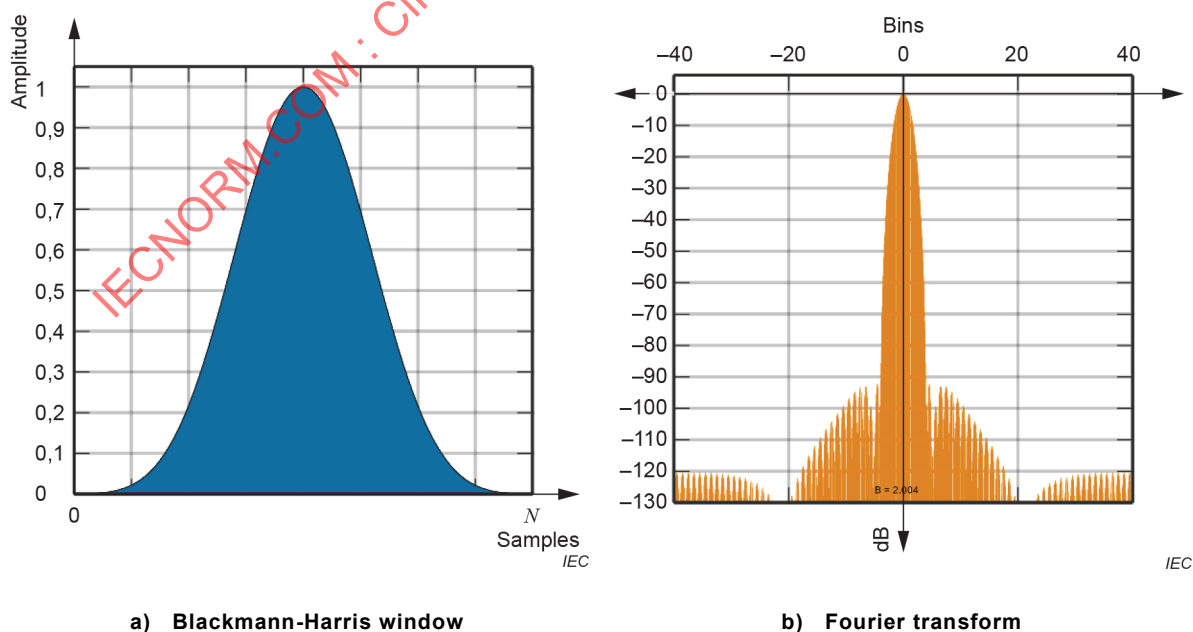
$a_3 = 0,388$;

$a_4 = 0,28$.

C.2 Window functions used for frequency domain noise measurements

The DAS self-noise test is specified to use frequency domain data for the determination of the IU noise floor. The Fourier conversion of the time series data collected is specified to use an appropriate window function prior to the frequency conversion. Two window functions Blackman-Harris and Hamming are particularly suitable for this purpose, and are briefly introduced below.

Figure C.2 depicts the characteristics of the Blackman-Harris window for a time series of N samples and the resulting Fourier transform exhibiting high side-lobe rejection across the resulting frequency bins [5].



SOURCE: https://en.wikipedia.org/wiki/Window_function#Blackman-Harris_window [5].

Figure C.2 – Blackman-Harris window and its Fourier transform characteristics

The generating function with amplitude coefficients for the Blackman-Harris window are provided in Formula (C.2):

$$w(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{N}\right) + a_3 \cos\left(\frac{6\pi n}{N}\right) \quad (\text{C.2})$$

where

n is the sample index;

N is the number of samples;

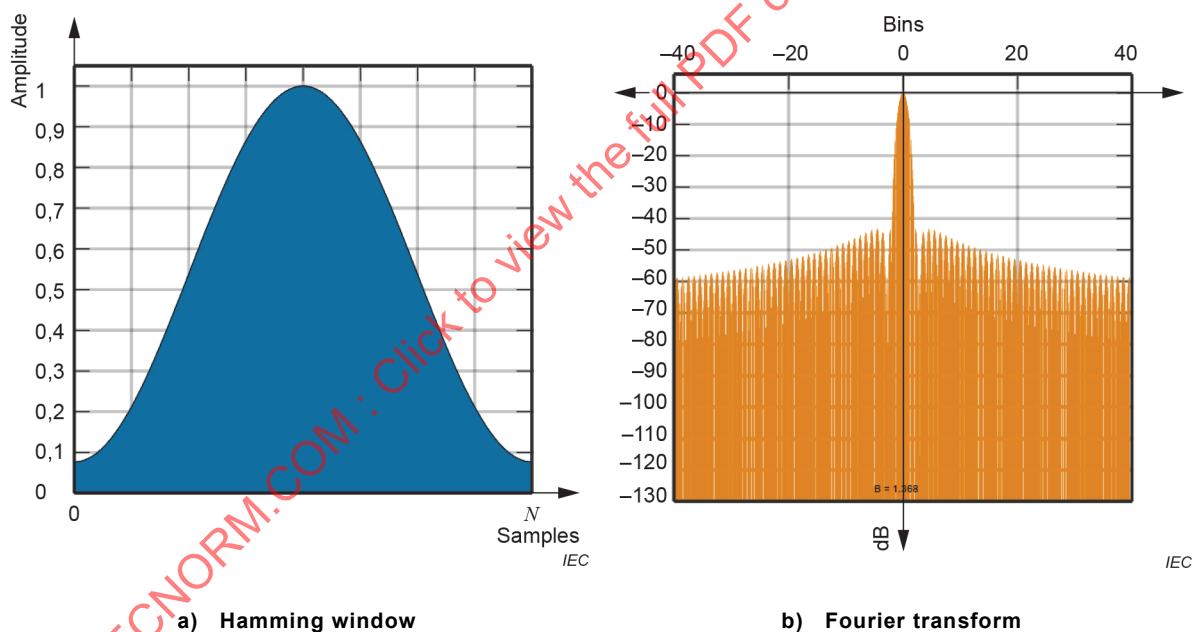
$a_0 = 0,358\ 75$;

$a_1 = 0,488\ 29$;

$a_2 = 0,141\ 28$;

$a_3 = 0,011\ 68$.

Figure C.3 depicts the characteristics of the Hamming window for a time series of N samples and the resulting Fourier transform exhibiting high side-lobe rejection across the resulting frequency bins [6]. The Hamming window is based on the Hann function.



SOURCE: https://en.wikipedia.org/wiki/Window_function#Hann_and_Hamming_windows [6].

Figure C.3 – Hamming window and its Fourier transform characteristics

The generating function with amplitude coefficients for the Hamming window is provided in Formula (C.3):

$$w(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (\text{C.3})$$

where

n is the sample index;

N is the number of samples;

$a_0 = 0,538\ 36$;

$a_1 = 0,461\ 64$.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61757-3-2:2022

Bibliography

- [1] SEAFOM MSP-02, *DAS Parameter Definitions and Tests*. Subsea Fiber Optic Monitoring Group – SEAFOM, Epsom (UK), August 2018
 - [2] IEC 60869-1, *Fibre optic interconnecting devices and passive components – Fibre optic passive power control devices – Part 1: Generic specification*
 - [3] Giallorenzi, T.G. et al: "Optical fibre sensor technology", *IEEE Journal of Quantum Electronics* (Volume: 18, Issue: 4, Apr 1982, pp. 626–665)
 - [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Window_function#Flat_top_window
 - [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Window_function#Blackman–Harris_window
 - [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Window_function#Hann_and_Hamming_windows
-

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61757-3-2:2022

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	53
INTRODUCTION.....	55
1 Domaine d'application	56
2 Références normatives	56
3 Termes, définitions, termes abrégés et symboles	56
3.1 Termes et définitions	56
3.2 Termes abrégés.....	60
3.3 Symboles.....	61
4 Paramètres de performance d'un système de détection acoustique réparti	61
5 Appareillage d'essai pour la détermination des paramètres de performance.....	62
5.1 Capteur à fibres simulé (SFS).....	62
5.2 Extenseur de fibre.....	63
5.3 Appareillage de génération et d'amplification de signaux	64
5.4 Affaiblisseur optique	64
5.5 Chambre d'isolement	65
6 Procédures d'essai des paramètres de performance.....	65
6.1 Généralités	65
6.2 Plage dynamique	65
6.2.1 Généralités.....	65
6.2.2 Montage	65
6.2.3 Stimulus	66
6.2.4 Collecte et traitement des données.....	66
6.2.5 Rapport de données	68
6.3 Réponse en fréquence	68
6.3.1 Généralités.....	68
6.3.2 Montage	68
6.3.3 Stimulus	69
6.3.4 Collecte et traitement des données.....	69
6.3.5 Rapport de données	70
6.4 Fidélité.....	72
6.4.1 Généralités.....	72
6.4.2 Montage	72
6.4.3 Stimulus	72
6.4.4 Collecte et traitement des données.....	73
6.4.5 Rapport de données	73
6.5 Bruit propre.....	73
6.5.1 Généralités.....	73
6.5.2 Montage	73
6.5.3 Stimulus	74
6.5.4 Collecte et traitement des données.....	74
6.5.5 Rapport de données	77
6.6 Résolution spatiale	78
6.6.1 Généralités.....	78
6.6.2 Montage	78
6.6.3 Stimulus	78
6.6.4 Collecte et traitement des données.....	78

6.6.5	Rapport de données	80
6.7	Diaphonie	81
6.7.1	Généralités	81
6.7.2	Montage	81
6.7.3	Stimulus	81
6.7.4	Collecte et traitement des données	81
6.7.5	Rapport de données	82
6.8	Bilan d'atténuation	82
6.8.1	Généralités	82
6.8.2	Montage	83
6.8.3	Stimulus	83
6.8.4	Collecte et traitement des données	83
6.8.5	Rapport de données	83
6.9	Robustesse aux réflexions du capteur	84
6.9.1	Généralités	84
6.9.2	Montage	84
6.9.3	Stimulus	86
6.9.4	Collecte, traitement et rapport de données	87
Annexe A (informative) Conversion d'une mesure de phase optique en déformation		88
Annexe B (normative) Exigences de mesure à faible incertitude		91
B.1	Essai de stimulus à tonalité unique	91
B.2	Essai de réponse en fréquence	92
Annexe C (informative) Fonctions de fenêtrage pour FFT		94
C.1	Fenêtre à toit plat utilisée pour les mesures de pics spectraux dans le domaine fréquentiel	94
C.2	Fonctions de fenêtrage utilisées pour les mesures de bruit dans le domaine fréquentiel	95
Bibliographie		98
Figure 1 – Système de détection acoustique répartie		57
Figure 2 – Paramètres d'un signal liés à une série chronologique et leur identification des points spatiaux		61
Figure 3 – Capteur à fibre simulé		63
Figure 4 – Configuration du SFS indiquant les emplacements TP ₁ , TP ₂ et TP ₃		63
Figure 5 – Montage pour l'essai de la plage dynamique		65
Figure 6 – Exemple de signal de stimulus de déformation et de phase rétablie de la réponse de l'IU avec une limite à 17 s		67
Figure 7 – Exemple de vue agrandie du signal de stimulus de déformation et de phase rétablie de la réponse de l'IU montrant un saut de phase à 16,98 s		68
Figure 8 – Montage pour l'essai de la réponse en fréquence		69
Figure 9 – Réponse en amplitude montrant les 40 signaux de stimulus et toutes les amplitudes associées		70
Figure 10 – Réponse de l'unité d'interrogation au stimulus d'essai, mise à l'échelle en unités de déformation, représentée dans le domaine fréquentiel		71
Figure 11 – Réponse en fréquence normée de l'unité d'interrogation		72
Figure 12 – Montage d'essai de fidélité		72
Figure 13 – Montage pour l'essai de bruit propre		74

Figure 14 – Champ de données 2D représentant le champ acoustique variable dans le temps en fonction de la distance	75
Figure 15 – Représentation schématique du traitement des données du plancher de bruit d'un système.....	76
Figure 16 – Exemple de tracé de données relatives au bruit propre	77
Figure 17 – Montage pour l'essai de résolution spatiale	78
Figure 18 – Points échantillons spatiaux à utiliser pour l'évaluation de la résolution spatiale.....	79
Figure 19 – Approche de restitution graphique utilisée pour déterminer la résolution spatiale.....	80
Figure 20 – Montage pour l'essai de diaphonie	81
Figure 21 – Points en surbrillance à échantillonner pour l'essai de diaphonie	82
Figure 22 – Exemple de tracé présentant les résultats de l'essai de diaphonie	82
Figure 23 – Montage pour l'essai de bilan d'atténuation.....	83
Figure 24 – Configurations de l'essai de robustesse aux réflexions du capteur	85
Figure 25 – Exemples de fabrication permettant de créer des réflexions partielles	86
Figure B.1 – Points échantillons spatiaux d'un extenseur de fibre.....	91
Figure B.2 – Tracé d'un stimulus à tonalité unique dans le domaine fréquentiel	92
Figure B.3 – Tracé de la réponse en fréquence d'un stimulus à tonalité unique	93
Figure C.1 – Fenêtre à toit plat et sa caractéristique de transformée de Fourier.....	94
Figure C.2 – Fenêtre de Blackman-Harris et sa caractéristique de transformée de Fourier.....	95
Figure C.3 – Fenêtre de Hamming et sa caractéristique de transformée de Fourier.....	96
Tableau A.1 – Relation entre phase optique et déformation	90

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CAPTEURS FIBRONIQUES –

**Partie 3-2: Détection acoustique et mesure des vibrations –
Détections réparties**

AVANT-PROPOS

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

L'IEC 61757-3-2 a été établie par le sous-comité SC 86C: Systèmes et dispositifs actifs à fibres optiques, du comité d'études TC 86 de l'IEC: Fibres optiques. Il s'agit d'une Norme internationale.

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

Projet	Rapport de vote
86C/1700/CDV	86C/1719/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à son approbation.

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents élaborés par l'IEC sont décrits de manière plus détaillée à l'adresse www.iec.ch/standardsdev/publications.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61757, publiées sous le titre général *Capteurs fibroniques*, se trouve 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 webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. A cette date, le document sera

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61757-3-2:2022

INTRODUCTION

Le présent document est basé sur SEAFOM Measuring Sensor Performance Document – 02 (SEAFOM MSP-02) [1]¹. Dans le contexte d'une liaison de type C, le SEAFOM a proposé le présent document à titre de nouveau sujet d'étude, qui a ensuite reçu l'approbation des membres participants de l'IEC SC 86C.

NOTE Sauf pour les Figure 1, Figure C.1, Figure C.2 et Figure C.3, toutes les figures du présent document ont été reprises du document SEAFOM MSP-02, soit sous leur forme d'origine, soit sous une forme modifiée, avec l'autorisation du SEAFOM.

La série IEC 61757 est publiée selon la logique suivante: les sous-parties sont numérotées sous la forme IEC 61757-M-T, où M représente la grandeur à mesurer et T la technologie.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61757-3-2:2022

¹ Les numéros entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

CAPTEURS FIBRONIQUES –

Partie 3-2: Détection acoustique et mesure des vibrations – Détections réparties

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61757 spécifie la terminologie, les paramètres de performance caractéristiques, les méthodes d'essai et de calcul associées, ainsi que le matériel d'essai spécifique pour les unités d'interrogation utilisées dans les systèmes fibroniques répartis de mesure de vibrations et de détection acoustique. Le présent document se réfère uniquement à la méthode de rétrodiffusion de Rayleigh et de détection de phase par réflectométrie optique cohérente dans le domaine temporel sensible à la phase (ϕ -OTDR). Les modes de fonctionnement quasi statiques et à basses fréquences ne sont pas traités dans le présent document.

Les spécifications génériques applicables aux capteurs fibroniques sont définies dans l'IEC 61757.

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 61757:2018, *Capteurs à fibres optiques – Spécification générique*

IEC 61757-2-2:2016, *Capteurs à fibres optiques – Partie 2-2: Mesure de température – Détection répartie*

3 Termes, définitions, termes abrégés et symboles

3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'IEC 61757, l'IEC 61757-2-2:2016, 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:

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

3.1.1

capteur à fibres optiques réparti

capteur à fibres optiques qui donne une mesure en 3 dimensions, d'une grandeur à mesurer sur une région étendue, au moyen d'un détecteur continu

[SOURCE: IEC 61757:2018, 3.5]

3.1.2

système fibronique réparti de détection acoustique

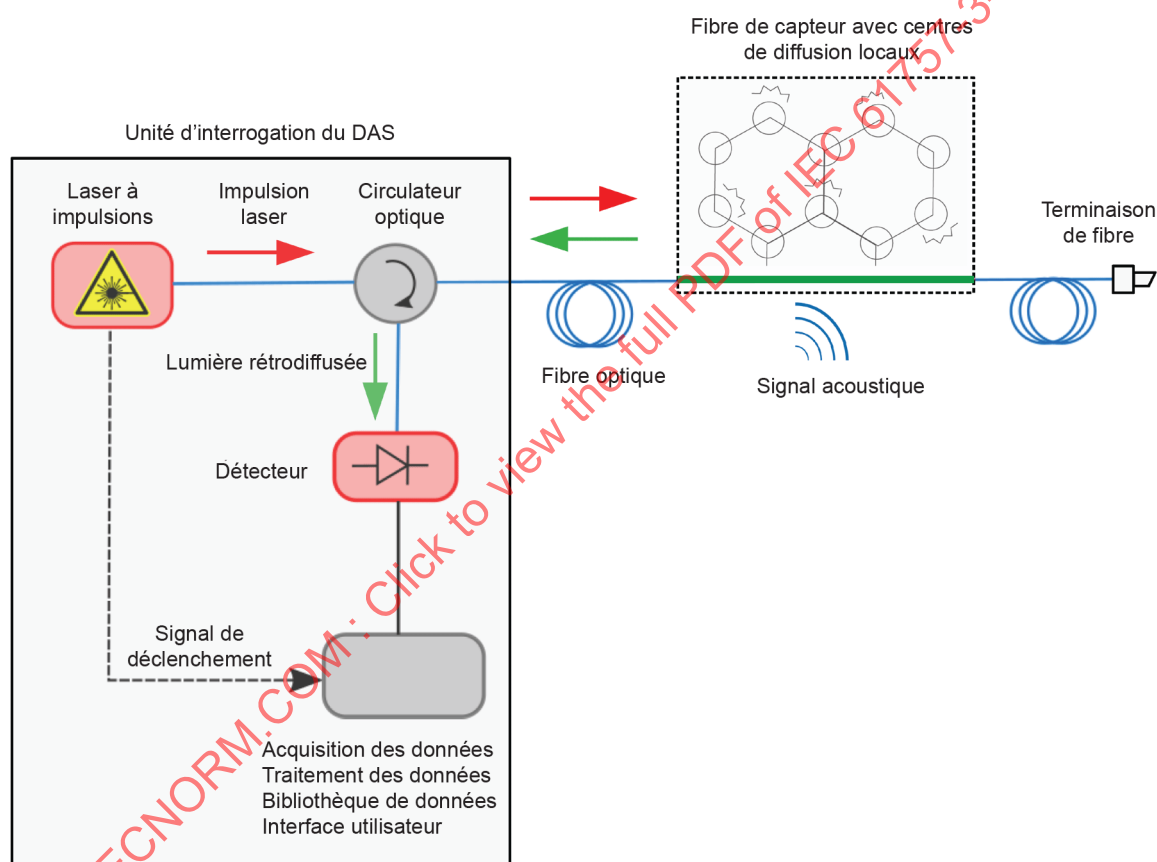
DAS

montage de mesure constitué d'un capteur fibronique réparti raccordé à une unité d'interrogation comprenant un processeur, une bibliothèque de données et une interface utilisateur, qui peut localement détecter des perturbations acoustiques ou induites par des vibrations (changement de phase des centres de rétrodiffusion) dans la fibre

Note 1 à l'article: Le terme "détection fibronique répartie des vibrations (DVS)" est également utilisé en synonyme dans l'industrie.

Note 2 à l'article: Voir la Figure 1 pour obtenir un montage DAS général. Les impulsions provenant d'une source cohérente sont envoyées dans la fibre de capteur par l'intermédiaire d'un circulateur optique, qui dévie également le signal cohérent de rétrodiffusion de Rayleigh vers un détecteur en vue d'une numérisation ultérieure et d'une acquisition rapide en temps réel.

Note 3 à l'article: En général, un DAS détecte les perturbations acoustiques ou celles induites par les vibrations à des fréquences inférieures à 2 kHz.



IEC

Figure 1 – Système de détection acoustique répartie

3.1.3

étendue de mesure de la distance

distance maximale (spécifiée en unités de longueur) depuis le connecteur de sortie de l'unité d'interrogation le long du capteur à fibres simulé, sur laquelle le DAS mesure un signal acoustique avec une performance de mesure spécifiée dans des conditions définies

[SOURCE: IEC 61757-2-2:2016, 3.2, modifié – Définition adaptée pour la détection acoustique.]

3.1.4

extenseur de fibre

dispositif dans lequel un stimulus externe entraîne une quantité de déformation linéairement proportionnelle et uniforme sur toute la longueur de la fibre connectée

Note 1 à l'article: L'extenseur de fibre se compose normalement d'un cylindre piézo-électrique auquel est appliqué un stimulus externe.

3.1.5

unité d'interrogation

IU

appareil opto-électronique raccordé au capteur à fibres optiques réparti, qui mesure et enregistre la déformation dynamique le long de la fibre

Note 1 à l'article: Le processeur, la bibliothèque de données et l'interface utilisateur peuvent être intégrés dans l'IU ou être fournis sous la forme d'une unité séparée raccordée à l'IU. L'IU assure les fonctions de traitement (normalisées ou personnalisées), l'archivage des données (généralement normalisé) et fournit une interface pour piloter et configurer l'unité d'interrogation, sélectionner les options de traitement, définir et implémenter les options de collecte de données (déclenchement, programmation ou autre).

3.1.6

emplacement

distance optique (spécifiée en unités de longueur) entre le connecteur de sortie de l'unité d'interrogation et un point échantillon de température souhaité dans le capteur à fibres simulé

[SOURCE: IEC 61757-2-2:2016, 3.7, modifié – Définition adaptée pour un capteur à fibres simulé.]

3.1.7

durée de mesure

temps entre deux mesures de signal acoustique indépendantes lors de mesures successives le long du capteur à fibres simulé

Note 1 à l'article: De même, il s'agit de l'intervalle de temps entre les horodatages successifs des traces dans ces conditions (voir Figure 2).

Note 2 à l'article: La fréquence d'interrogation (spécifiée en Hz) correspond au taux d'impulsions des unités d'interrogation qui assurent l'interrogation des impulsions optiques. Elle est égale à l'inverse de la durée de mesure (voir Figure 2).

[SOURCE: IEC 61757-2-2:2016, 3.8, modifié – Définition adaptée pour la détection acoustique.]

3.1.8

fréquence de Nyquist

fréquence représentée par la durée ou la période de la moitié du taux d'interrogation ou d'échantillonnage, la plus petite valeur étant retenue

EXEMPLE Pour un taux d'interrogation de 20 kHz (20 000 échantillons par seconde), la fréquence de Nyquist est de 10 kHz.

3.1.9

densité spectrale de puissance

DSP

racine carrée de la densité spectrale de puissance obtenue à partir de données de série chronologique converties en données dans le domaine fréquentiel

3.1.10

numéro d'échantillon

numéro d'ordre d'un échantillon dans une série chronologique

3.1.11**taux d'échantillonnage**

vitesse à laquelle les données acoustiques brutes sont générées par l'unité d'interrogation

Note 1 à l'article: Le taux d'échantillonnage maximal est égal au taux d'interrogation. Le taux d'échantillonnage s'applique lorsque le taux d'interrogation est réduit (par décimation ou autre) par l'unité d'interrogation avant la génération des données.

3.1.12**numéro de point échantillon**

point échantillon spatial dont la numérotation consécutive augmente sur la longueur du capteur

Note 1 à l'article: Le premier point échantillon spatial débute à zéro.

3.1.13**résolution spatiale**

valeur moyenne des intervalles des échantillons spatiaux qui se situent dans les limites de la pente croissante et/ou décroissante d'une réponse à un échelon générée par une variation localement abrupte du signal de stimulus, exprimée en unités de longueur

Note 1 à l'article: Le fabricant de l'unité d'interrogation conçoit et/ou implémente par voie matérielle et/ou logicielle la résolution spatiale, qui peut être contrôlée par l'utilisateur.

Note 2 à l'article: La Figure 19 présente l'approche de restitution graphique utilisée pour déterminer la résolution spatiale.

3.1.14**espacement des points échantillons spatiaux**

distance (exprimée en unités de longueur) entre deux points échantillons consécutifs dans un signal acoustique unique

[SOURCE: IEC 61757-2-2:2016, 3.11, modifié – Définition adaptée pour la détection acoustique.]

3.1.15**point échantillon spatial****SSP**

un des points situés le long du capteur à fibres simulé, qui sont définis par l'intermédiaire de la configuration ou le montage de l'unité d'interrogation et représentés spatialement le long de la fibre sous forme de points équidistants à partir desquels l'unité d'interrogation échantillonne la lumière rétrodiffusée

3.1.16**sensibilité aux déformations**

$\varepsilon_{\text{sens}}$

plancher de bruit du DAS défini en tant que déformation:

$$\varepsilon_{\text{sens}} = \frac{\lambda d\phi}{4\pi n G \xi} \quad (1)$$

où

λ est la longueur d'onde optique (sous vide) de fonctionnement du DAS;

n est l'indice de réfraction de la fibre de détection (indice de groupe);

G est la résolution spatiale utilisée par le DAS;

ξ est le facteur d'échelle photo-élastique pour la déformation longitudinale dans un matériau isotrope (= 0,78);

$d\phi$ est le plancher de bruit du système en radians

3.1.17

série chronologique

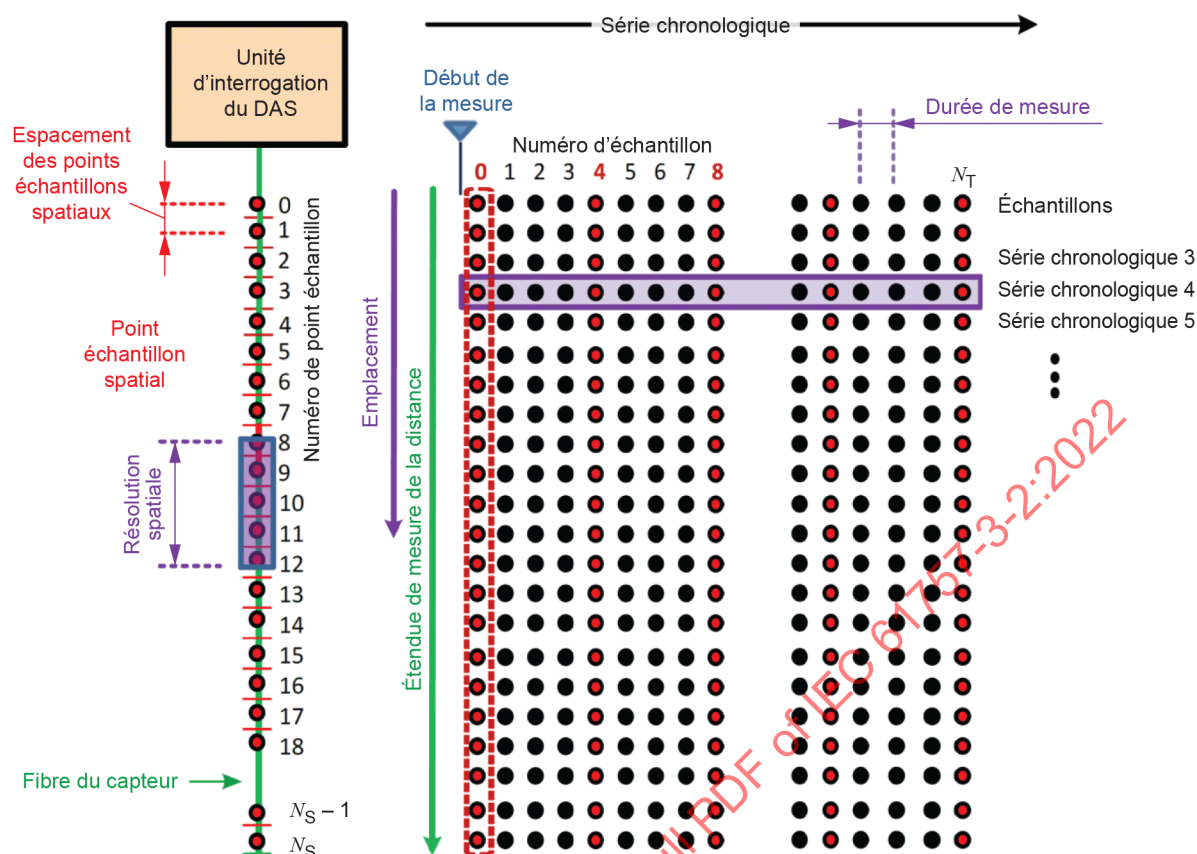
ensemble de données pour un point échantillon particulier, qui est représenté tel qu'échantillonné au taux d'interrogation

Note 1 à l'article: La série chronologique peut également être représentée à un taux de sous-échantillonnage du taux d'interrogation. Quel que soit le taux choisi, il doit être utilisé pour tous les essais décrits dans le présent document.

Note 2 à l'article: La Figure 2 représente les paramètres d'un signal liés à une série chronologique et leur identification des points spatiaux.

3.2 Termes abrégés

CL	crosstalk level (niveau de diaphonie)
DAS	distributed fibre optic acoustic sensing system (système fibronique reparté de détection acoustique)
FBG	fibre Bragg grating (réseau de Bragg à fibres)
FFT	fast Fourier transform (transformée de Fourier rapide)
IU	interrogation unit (unité d'interrogation)
OTDR	optical time-domain reflectometry (réflectométrie optique dans le domaine temporel)
PR	partial reflector (réflecteur partiel)
PSD	power spectral density (densité spectrale de puissance)
RL	reference level (niveau de référence)
SEC	section
SFS	simulated fibre sensor (capteur à fibres simulé)
SNR	signal-to-noise ratio (rapport signal/bruit)
SR	signal response (réponse à un signal)
SSP	spatial sample point (point échantillon spatial)
TP	test point (point d'essai)



IEC

SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduit avec l'autorisation du SEAFOM.

Figure 2 – Paramètres d'un signal liés à une série chronologique et leur identification des points spatiaux

3.3 Symboles

L_s	longueur de l'extenseur de fibre
$L_{F,tot}$	longueur totale de la fibre
L_L, L_R	longueur de la ligne à pente décroissante vers la gauche/droite
M, M_C, M_{CN}	amplitude, amplitude compensée, amplitude compensée et normée
P	facteur de normalisation
$\mu\epsilon$	grandeur technique sans dimension de l'allongement linéique égale au rapport de l'augmentation de longueur Δl à la longueur l_0 de l'ordre de 10^{-6}

4 Paramètres de performance d'un système de détection acoustique réparti

La performance technique d'un DAS doit être caractérisée par les paramètres de performance suivants. L'Article 6 décrit les procédures d'essai associées qui permettent de déterminer ces paramètres:

- plage dynamique (voir 6.2);
- réponse en fréquence (voir 6.3);
- fidélité [facultatif] (voir 6.4);
- bruit propre (voir 6.5);
- résolution spatiale (voir 6.6);

- f) diaphonie (voir 6.7);
- g) bilan d'atténuation (voir 6.8);
- h) robustesse aux réflexions du capteur (voir 6.9).

5 Appareillage d'essai pour la détermination des paramètres de performance

5.1 Capteur à fibres simulé (SFS)

Chaque paramètre de performance doit être évalué en utilisant un capteur à fibres simulé (SFS) d'une longueur de fibre totale ($L_{F,tot}$) appropriée, raccordé à chaque équipement IU soumis à essai.

Le SFS doit être installé comme représenté à la Figure 3. Du point de vue fonctionnel, il doit se composer de quatre bobines de retard et de trois extenseurs de fibre qui sont reliés par épissurage afin de former bout à bout la longueur $L_{F,tot}$. Sur cette représentation, tous les composants sont représentés avec des fibres amorce à surface terminale biseautée, avec un type de connecteur librement choisi au début et à la fin de la longueur $L_{F,tot}$. Il convient que la fin de la longueur $L_{F,tot}$ présente un affaiblissement de réflexion > 50 dB.

Tous les éléments du SFS doivent être placés dans une chambre isolée qui assure l'immunité aux perturbations acoustiques et aux vibrations (voir 5.5).

Chacun des trois extenseurs de fibre se compose d'une fibre de longueur L_s . Les extenseurs de fibre sont situés entre les quatre bobines de retard et représentent les emplacements qui seront utilisés pour un grand nombre des essais de détermination des paramètres de performance. Ces emplacements sont désignés TP_1 , TP_2 et TP_3 .

Les longueurs des bobines de retard 1 à 4 doivent être déterminées à l'aide des relations suivantes:

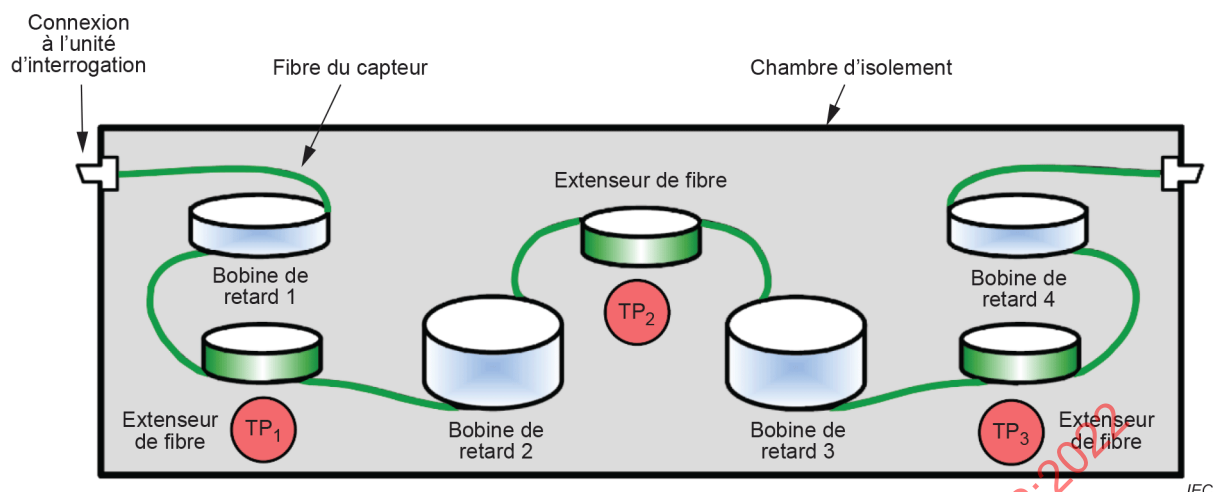
- a) les longueurs des bobines de retard 1 et 4 sont fixées à 250 m;
- b) les longueurs des bobines de retard 2 et 3 sont fixées à $L_{F,tot}' / 2$,

où

$$L_{F,tot}' = L_{F,tot} - 500 \text{ m} - 3 L_s;$$

$L_{F,tot}$ est la longueur de fibre totale;

L_s est la longueur d'un extenseur de fibre.



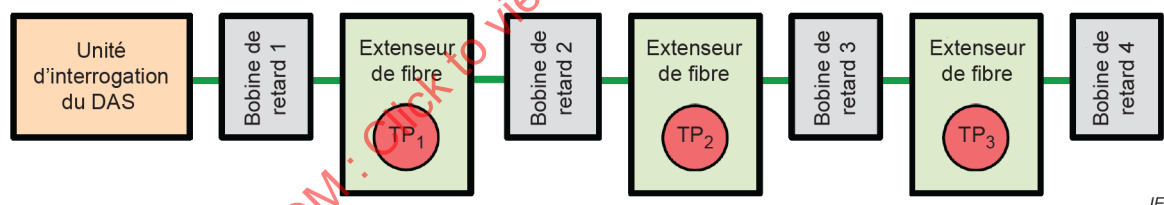
SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduit avec l'autorisation du SEAFOM.

Figure 3 – Capteur à fibre simulé

Les trois points d'essai de la Figure 3 coïncident avec les emplacements centraux des extenseurs de fibre et sont désignés comme suit:

- TP₁: emplacement de "début": extenseur de fibre entre les bobines de retard 1 et 2
 TP₂: emplacement du "milieu": extenseur de fibre entre les bobines de retard 2 et 3
 TP₃: emplacement de "fin": extenseur de fibre entre les bobines de retard 3 et 4

Ces trois emplacements sont représentés à la Figure 4 et désignés TP₁, TP₂ et TP₃.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduit avec l'autorisation du SEAFOM.

Figure 4 – Configuration du SFS indiquant les emplacements TP₁, TP₂ et TP₃

Des procédures d'évaluation individuelles peuvent être appliquées avec un type de montage modifié fournissant les conditions de mesure exigées. Dans ce cas, une description détaillée et une documentation du montage sont exigées.

5.2 Extenseur de fibre

L'extenseur de fibre est utilisé dans la majorité des essais de détermination des paramètres de performance qui exigent un "stimulus" sous la forme d'une extension vibratoire variable de la fibre. Il se compose généralement d'une fibre de capteur enroulée autour d'un tube ou cylindre piézo-électrique soumis à une polarisation radiale. Pour que les extenseurs de fibre réalisent les essais de détermination des paramètres de performance de manière efficace, il convient qu'ils remplissent les conditions suivantes:

- Diamètre (type) du cylindre: > 5 cm (2 in. par exemple) (pour les faibles pertes par macrocourbures)
 Type de fibre: identique à celui de la fibre du SFS

Longueur de l'extenseur de fibre:	La longueur de fibre à déformer doit être enroulée sur l'extenseur de fibre. La longueur (sans les cordons) doit être supérieure au double de la résolution spatiale de l'unité d'interrogation en cours d'évaluation. Cependant, si cette longueur ne couvre pas au moins 10 SSP, une longueur supplémentaire doit être ajoutée pour atteindre une telle couverture. Des longueurs plus importantes sont acceptables.
Extension de la fibre:	L'extension doit être uniforme sur toute la longueur de la fibre à déformer et constante sur la plage de fréquences spécifiée. Si la réponse en fréquence n'est pas constante, notamment aux fréquences plus élevées, une compensation de données peut être effectuée pour obtenir une uniformité suffisante.
Plage de fréquences:	1 % à 80 % de la fréquence de Nyquist.
Niveaux de déformation (dynamique):	jusqu'à (14 $\mu\epsilon$ en valeur crête) / (résolution spatiale) selon l'application

NOTE 1 Le niveau de déformation élevé indiqué peut convenir pour la fréquence la plus basse lors de l'essai de la plage dynamique. Il est possible (pour cet essai particulier) qu'un amplificateur de tension soit nécessaire entre le générateur de signaux et l'extenseur de fibre. Tous les autres essais du présent document impliquent des niveaux de déformation dynamique nettement inférieurs et ne nécessitent aucune amplification.

NOTE 2 Un système de mesure indépendant à réseau de Bragg à fibres peut être utilisé pour contrôler le niveau de déformation assuré par l'extenseur de fibre.

En cas d'utilisation d'une construction alternative du cylindre piézo-électrique, les paramètres de performance obtenus doivent être comparables.

5.3 Appareillage de génération et d'amplification de signaux

Un générateur de signaux est nécessaire pour produire les signaux d'attaque de l'extenseur de fibre. Ce générateur de signaux doit être capable de fonctionner sur la plage de réponse en fréquence spécifiée en 6.3. Il convient que le générateur de signaux produise des ondes sinusoïdales à faible distorsion (en général une distorsion harmonique totale < -54 dB) et présente des sorties faiblement parasites (généralement < -60 dB) sur la plage de réponse en fréquence.

La majorité des modèles d'extenseur de fibre peuvent être directement pilotés avec des générateurs de signaux disponibles dans le commerce. Si une amplification est nécessaire, l'amplificateur doit produire des amplitudes de tension d'attaque suffisamment importantes pour atteindre des niveaux de déformation de fibre proportionnels aux exigences de stimulus spécifiées à l'Article 6.

5.4 Affaiblisseur optique

Pour l'essai de détermination du paramètre de performance de bilan d'affaiblissement optique (voir la Figure 22), un affaiblisseur optique étalonné ou une approche d'affaiblissement optique ou un affaiblisseur qui peut être autocalibré est exigé (voir l'IEC 60869-1 [2] pour de plus amples informations).

Recommandations applicables à un affaiblisseur optique accordable:

Étalonné pour la longueur d'onde de fonctionnement:	oui (ou autocalibré avec un mesureur de puissance)
Plage d'affaiblissement variable:	2 dB à 6 dB
Résolution de réglage d'affaiblissement:	selon les besoins; exactitude présumée de 0,1 dB

L'utilisation d'affaiblisseurs fixes calibrés est également acceptable.

5.5 Chambre d'isolement

Le SFS utilise des bobines de fibre qui sont sensibles aux perturbations environnementales telles que l'acoustique d'une pièce et les vibrations de la pièce ou de la table de mesure. Par conséquent, des mesures doivent être prises pour s'assurer que les perturbations environnementales n'altèrent pas les données pendant la mesure des paramètres de performance.

La chambre d'isolement doit se composer d'une enceinte acoustique permettant de créer une zone expérimentale thermiquement stable et acoustiquement protégée. A l'intérieur de cette enceinte, l'expérience doit encore être isolée de l'environnement avec une plate-forme antivibratile à rigidité négative, afin d'assurer une isolation contre les vibrations à basse fréquence de l'ordre de 1 Hz.

6 Procédures d'essai des paramètres de performance

6.1 Généralités

Toutes les procédures d'essai ont été élaborées de manière à utiliser un banc d'essai unique. Ce banc se présente sous la forme d'un capteur à fibres simulé SFS (voir 5.1) qui doit être utilisé pour tous les essais. Le SFS doit être isolé de l'acoustique et des vibrations de la pièce au moyen d'une chambre d'isolement décrite en 5.5 pour tous les essais.

Selon l'application prévue pour le DAS, les valeurs appropriées pour les paramètres de l'essai de stimulus doivent être utilisées. Les valeurs des paramètres de l'essai de stimulus énumérées de 6.2 à 6.9 sont fournies à titre de recommandations. Il convient de les utiliser autant que possible afin de faciliter les comparaisons de systèmes.

Le personnel qui réalise les mesures et les évaluations doit être suffisamment expérimenté avec la technologie des capteurs fibroniques et les techniques de mesure associées.

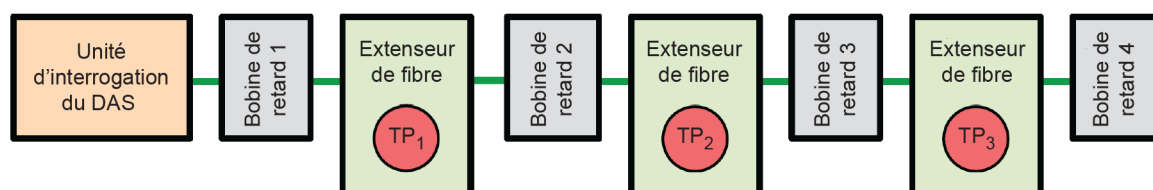
6.2 Plage dynamique

6.2.1 Généralités

L'objectif d'un DAS est de produire un signal directement proportionnel à l'amplitude de la déformation acoustique appliquée, variable dans le temps et agissant sur la fibre de détection. La plage dynamique du système est une mesure de la plage d'amplitudes sur laquelle le système peut précisément représenter le stimulus acoustique appliqué.

6.2.2 Montage

Le capteur à fibres simulé doit être stimulé par des extenseurs de fibre jusqu'au niveau maximal de stimulation, auquel le signal résultant n'est pas corrompu par rapport au stimulus d'entrée. Un stimulus doit être appliqué à trois emplacements différents, TP_1 , TP_2 et TP_3 , le long du SFS, tel que représenté à la Figure 5.



IEC

SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduit avec l'autorisation du SEAFOM.

Figure 5 – Montage pour l'essai de la plage dynamique

6.2.3 Stimulus

Pour mesurer la plage dynamique, il convient d'utiliser le stimulus suivant:

Type de signal: Sinusoïdal
 Fréquences: 1 %, 5 %, 20 % et 80 % de la fréquence de Nyquist
 Niveau de signal (valeur de crête): plancher de bruit jusqu'à (π /résolution spatiale/durée de mesure) (dans la limite indiquée par l'extenseur de fibre)

EXEMPLE Si la fréquence est égale à 1 % de la fréquence de Nyquist, la plage du niveau de signal maximal est 200π /résolution spatiale.

Le signal de stimulus doit débiter à un niveau de signal inférieur à la limite maximale attendue, puis augmenter linéairement dans le temps jusqu'à la limite maximale attendue précédente. La stimulation doit être appliquée indépendamment à chaque emplacement de position d'essai, TP₁, TP₂ et TP₃.

6.2.4 Collecte et traitement des données

Les données suivantes doivent être collectées à chaque emplacement TP₁, TP₂ et TP₃:

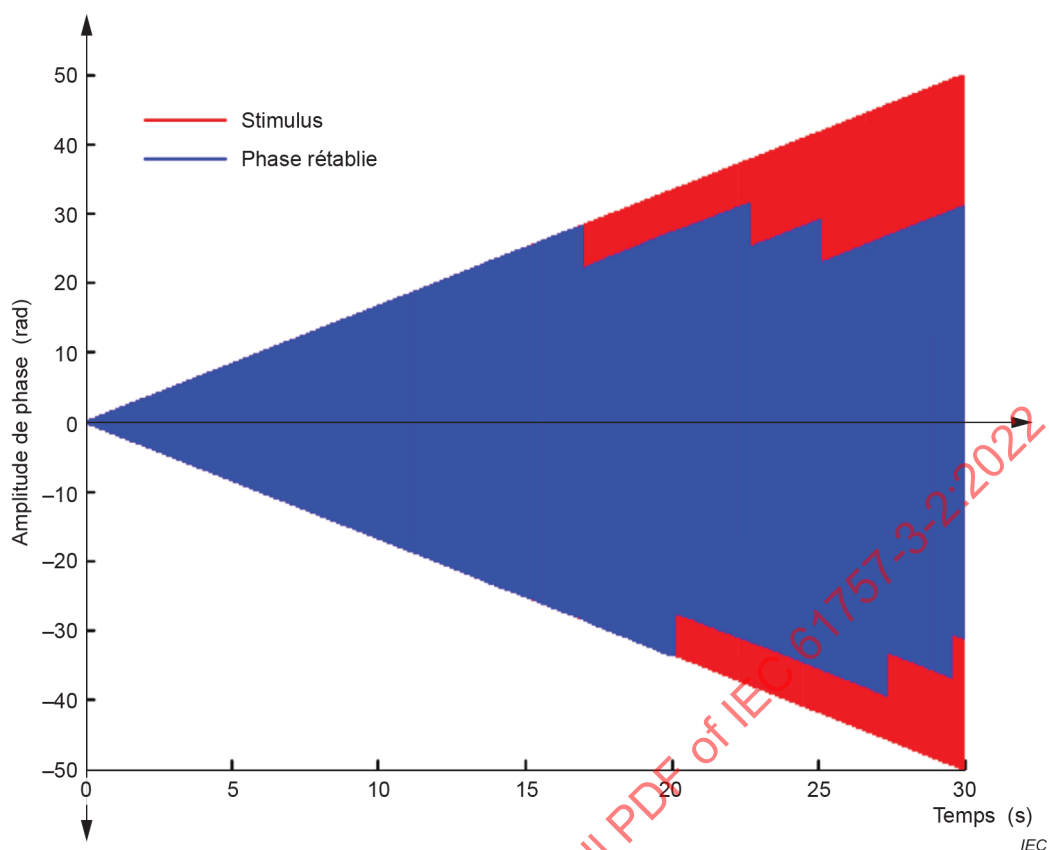
Echantillons par emplacement: Selon les besoins pour couvrir la plage de stimuli
 Durée à chaque emplacement: Selon les besoins pour assurer une mesure à faible incertitude (voir l'Annex B)

Les données collectées doivent être traitées comme suit:

- a) signal: examen du stimulus dans le domaine temporel et du signal de réponse;
- b) limite de plage dynamique: cette limite est atteinte lorsque le signal de réponse présente une distorsion ou subit sa première discontinuité;
- c) l'essai doit être répété 5 fois. La valeur moyenne des limites déterminées doit être calculée.

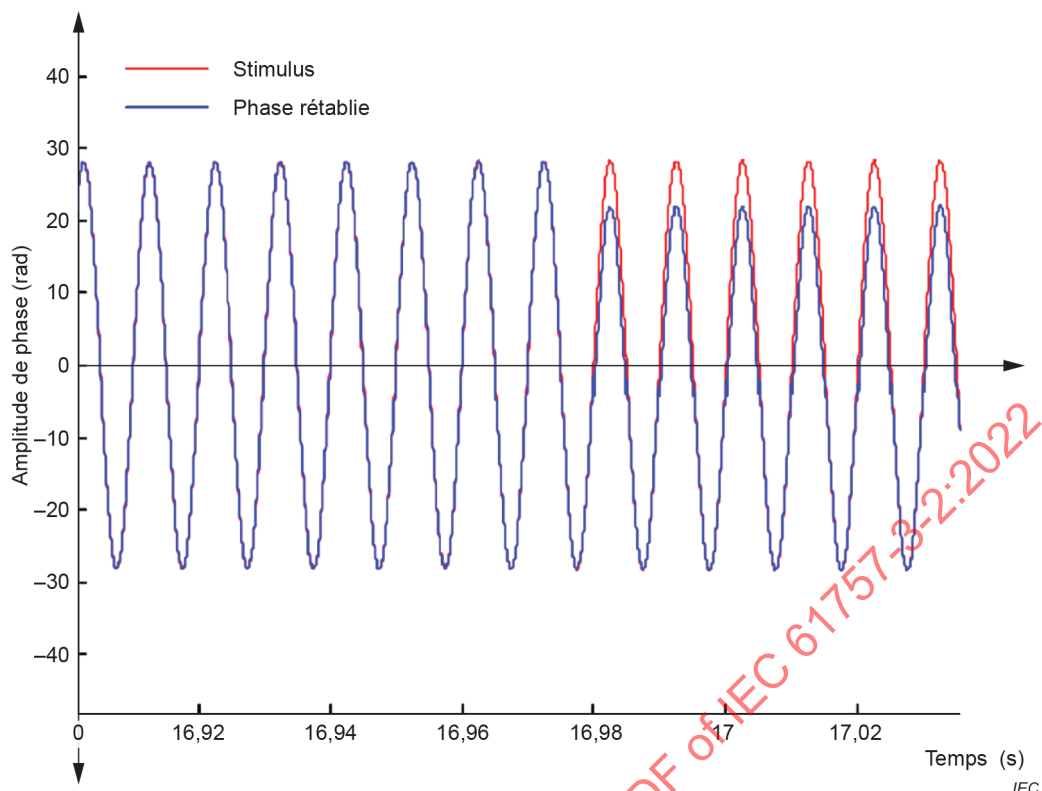
La plage dynamique est égale à l'amplitude du signal de stimulus moyen (unités de phase optique converties en unités de déformation d'après la Formule (A.7) de l'Annex A).

La Figure 6 et la Figure 7 représentent le traitement du signal. Elles présentent une simulation de mesure, réalisée par un IU, d'un signal de stimulus de déformation de 100 Hz qui débute à une amplitude nulle et augmente progressivement sur un laps de temps de 30 s. La Figure 6 représente le signal de stimulus et le signal de phase optique (ou le signal de déformation dynamique) mesurés par l'IU. Après 17 s environ (correspondant à une certaine déformation), l'IU subit une transition discontinue. Ce phénomène est représenté en vue agrandie à la Figure 7.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduit avec l'autorisation du SEAFOM.

Figure 6 – Exemple de signal de stimulus de déformation et de phase rétablie de la réponse de l'IU avec une limite à 17 s



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduit avec l'autorisation du SEAFOM.

Figure 7 – Exemple de vue agrandie du signal de stimulus de déformation et de phase rétablie de la réponse de l'IU montrant un saut de phase à 16,98 s

6.2.5 Rapport de données

La déformation de crête maximale obtenue, multipliée par la résolution spatiale, doit être consignée dans le rapport. Cette valeur est la limite de déformation de résolution spatiale. Elle est déterminée pour les fréquences générées à 3 positions différentes (soit un total de 12 valeurs). Les données doivent être présentées sous forme de tableau.

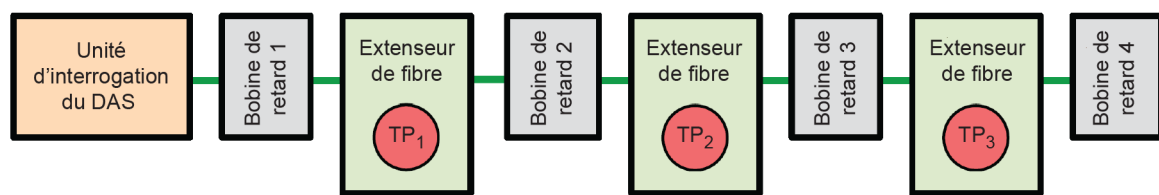
6.3 Réponse en fréquence

6.3.1 Généralités

L'essai de réponse en fréquence de l'IU indique l'exactitude de l'IU lors de la mesure de l'amplitude des signaux détectés sur la plage de fréquences de fonctionnement. Cet essai ne couvre que l'amplitude et le gain (courbe de gain) de la réponse en fréquence.

6.3.2 Montage

La réponse en fréquence doit être mesurée en stimulant le SFS sur la plage de fréquences de fonctionnement de l'IU. Les mesures doivent inclure l'amplitude de la réponse en fréquence à déterminer aux trois emplacements TP_1 , TP_2 et TP_3 , comme représenté à la Figure 8.



IEC

SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduit avec l'autorisation du SEAFOM.

Figure 8 – Montage pour l'essai de la réponse en fréquence

6.3.3 Stimulus

Pour mesurer la réponse en fréquence, il convient d'utiliser le stimulus suivant:

Type de signal: Balayage de tonalités sinusoïdales séquentielles (40 échelons de fréquence)

Fréquences: Taux d'interrogation ≤ 20 kHz: 2 % à 80 % de la fréquence de Nyquist

Taux d'interrogation > 20 kHz: 200 Hz à 8 kHz

Nombre de fréquences: 40

Durée de stimulus pour chaque fréquence: 2,5 s

Durée de balayage sur la plage de fréquences: 100 s

Niveau de signal: 0,08 $\mu\epsilon$ (valeur crête) / (résolution spatiale) ou, si nécessaire, à des niveaux inférieurs pour produire une réponse monotone de l'IU sur la plage de fréquences.

Le stimulus doit être appliqué indépendamment aux trois emplacements TP_1 , TP_2 et TP_3 .

6.3.4 Collecte et traitement des données

Le signal de stimulus étant défini, l'approche de l'essai implique les étapes suivantes:

- générer le fichier de stimulus en vue d'une implémentation dans un générateur de forme d'onde arbitraire;
- appliquer le stimulus aux trois points d'essai TP_1 , TP_2 , et TP_3 définis en 6.3.2 et 6.3.3;
- collecter les données de réponse au signal S_R : enregistrer un nombre d'échantillons suffisant pour couvrir toute la plage de balayage (nombre total d'échantillons N).

Les enregistrements temporels doivent d'abord être convertis dans le domaine fréquentiel par transformée de Fourier (FFT), sans fenêtre, en données de densité spectrale de puissance (amplitude) PSD:

- Calculer la transformée de Fourier de S_R :

$$Y = \text{FFT}(S_R) \quad (2)$$

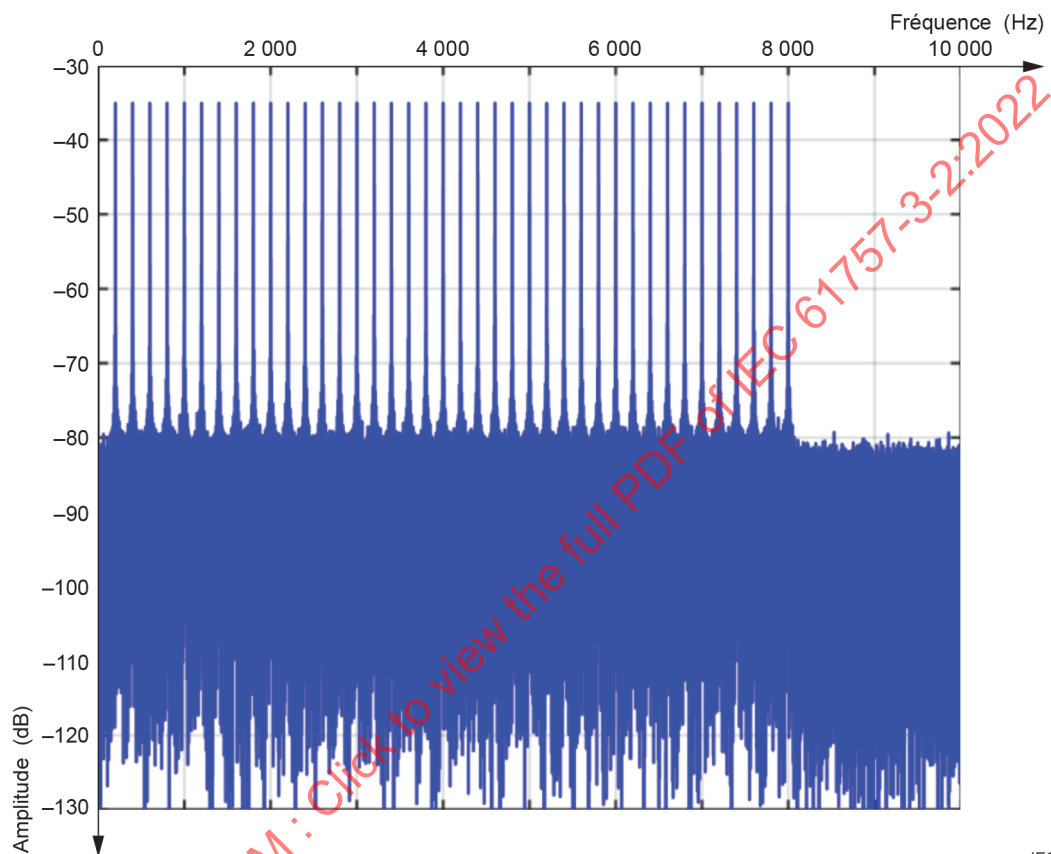
- Déterminer le facteur de normalisation P :

$$P = \sqrt{N} \quad (3)$$

3) Calculer l'amplitude M :

$$M = P \cdot |(Y)|^2 \quad (4)$$

La Figure 9 représente un tracé type de M , où un taux d'interrogation de 20 kHz est appliqué. La réponse couvre toute la plage de fréquences de Nyquist et comporte 40 tonalités, la tonalité la plus élevée apparaissant à 80 % de la fréquence de Nyquist.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduit avec l'autorisation du SEAFOM.

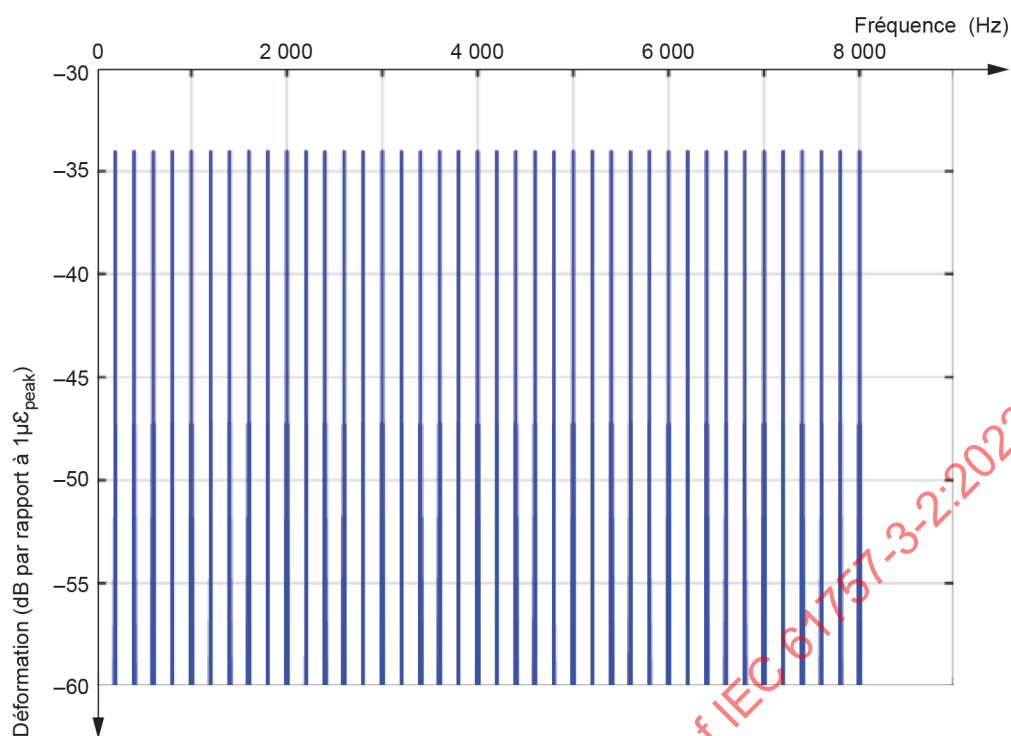
Figure 9 – Réponse en amplitude montrant les 40 signaux de stimulus et toutes les amplitudes associées

6.3.5 Rapport de données

Le rapport de données pour l'essai de réponse en fréquence doit se présenter sous la forme d'un tracé unique qui indique la réponse en amplitude des fréquences d'essai sélectionnées. Ce tracé doit être obtenu à partir des données de réponse mesurées M et traité comme suit:

- générer pour chacun des trois points d'essai TP_1 , TP_2 et TP_3 un graphique de la réponse de l'unité d'interrogation M au stimulus d'essai avec les paramètres suivants:
 - plage de fréquences: linéaire de 0 Hz jusqu'à la fréquence de Nyquist;
 - échelle d'amplitude: valeur de crête en fonction des unités de déformation en dB (pas d'élévation au carré de la déformation);
 - plage d'amplitude: suffisante pour inclure l'indicateur de l'entrée de stimulus prévue

Un graphique type est représenté à la Figure 10.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduit avec l'autorisation du SEAFOM.

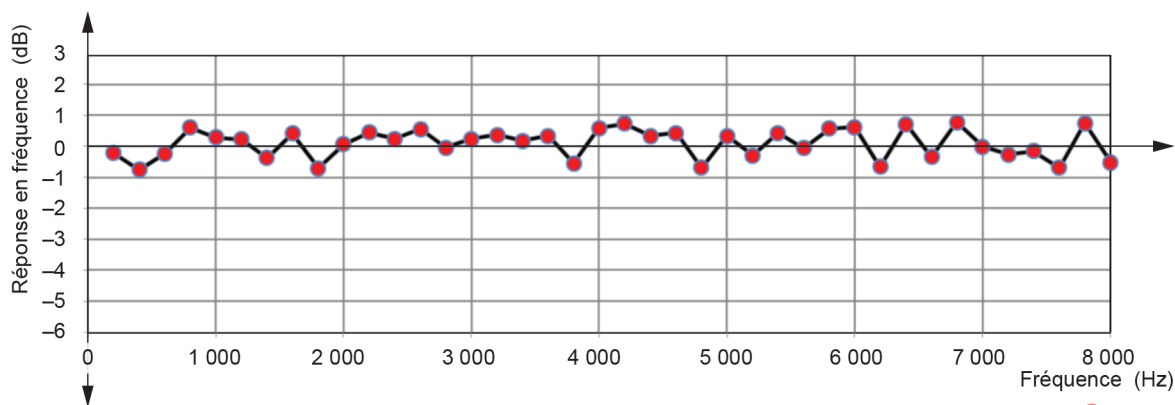
Figure 10 – Réponse de l'unité d'interrogation au stimulus d'essai, mise à l'échelle en unités de déformation, représentée dans le domaine fréquentiel

b) calculer, pour chacun des trois points d'essai TP_1 , TP_2 et TP_3 , la réponse en fréquence corrigée et normée:

- 1) corriger les données de réponse M afin de compenser la réponse en fréquence (amplitude) de l'extenseur de fibre. Le fichier de résultats est M_C et conserve uniquement les valeurs des fréquences d'essai sélectionnées;
- 2) calculer la valeur moyenne des valeurs de crête M_C corrigées et normées à ce niveau. Le fichier de résultats est M_{CN} ;
- 3) créer un graphique de M_{CN} avec les paramètres suivants:
 - la plage de fréquences est linéaire de 0 Hz jusqu'à la plus haute fréquence soumise à essai;
 - échelle d'amplitude en dB: $(20 \cdot \log_{10} (\text{valeur } M_{CN}))$;
 - plage d'amplitude: 9 dB (+3 dB à -6 dB)

Si les données mesurées se situent en dehors de la plage spécifiée, alors étendre la plage du tracé d'un côté ou de l'autre en conséquence.

Un graphique type est représenté à la Figure 11.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduit avec l'autorisation du SEAFOM.

Figure 11 – Réponse en fréquence normée de l'unité d'interrogation

NOTE La réponse en fréquence d'un extenseur de fibre piézo-électrique peut ne pas être parfaitement plate sur la plage de fréquences de l'essai. En général, la sensibilité augmente en même temps que la fréquence en s'approchant progressivement de la résonance circonférentielle. Si tel est le cas, alors le graphique créé à l'étape b) permet de corriger les données de M de sorte qu'il se rapporte uniquement à la réponse de l'U.

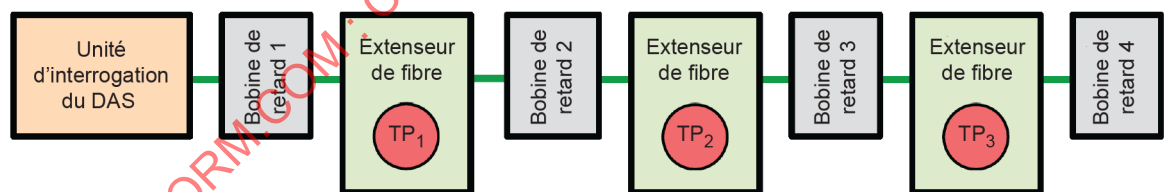
6.4 Fidélité

6.4.1 Généralités

L'essai de fidélité est facultatif et fournit des informations sur la distorsion ou le comportement linéaire du DAS.

6.4.2 Montage

Le SFS doit être stimulé avec des tonalités sinusoïdales de niveau variable. Les mesures doivent être réalisées aux trois emplacements TP_1 , TP_2 et TP_3 , comme représenté à la Figure 12.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduit avec l'autorisation du SEAFOM.

Figure 12 – Montage d'essai de fidélité

6.4.3 Stimulus

Pour mesurer la fidélité, il convient d'utiliser le stimulus suivant:

Type de signal: Sinusoïdal

Fréquence: 10 % de la fréquence de Nyquist

NOTE Si cette fréquence coïncide avec celle du secteur et produit des interférences de ligne, il est admis de faire varier la valeur de la fréquence de ± 20 %.

Niveaux de signal (valeur de crête): (0,08 $\mu\epsilon$, 0,25 $\mu\epsilon$ et 0,8 $\mu\epsilon$) / (résolution spatiale)

6.4.4 Collecte et traitement des données

Les données de la série chronologique doivent être collectées à chacun des emplacements du stimulus. Les échantillons à chaque SSP sélectionné doivent être enregistrés pendant une durée de 1 min.

Les données collectées doivent être traitées comme suit:

- décomposer les enregistrements de données chronologiques sur 1 min en une série de longueur réduite (par exemple de 16 384 échantillons). L'objectif est de produire 10 ensembles de données à chaque emplacement;
- transformer les enregistrements de la série chronologique par FFT avec une fenêtre à toit plat, en éliminant les données qui ne satisfont pas au critère de "mesure à faible incertitude" (voir l'Annex B);
- parmi les données restantes, calculer le pourcentage de distorsion harmonique totale THD_{FT} en utilisant les harmoniques d'ordre 2 à 5 et en calculant la moyenne de 10 ensembles:

$$THD_{FT} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2}}{V_1} \quad (5)$$

où

V_n est le niveau de signal (et non le niveau de puissance) de la n -ème harmonique, $n = 1$ à 5.

6.4.5 Rapport de données

Le pourcentage de distorsion harmonique totale THD_{FT} doit être consigné dans le rapport, à chacun des trois niveaux et à chacun des trois emplacements. Il y a 9 valeurs de données à consigner (exprimées en pourcentage). Les données doivent être présentées sous forme de tableau.

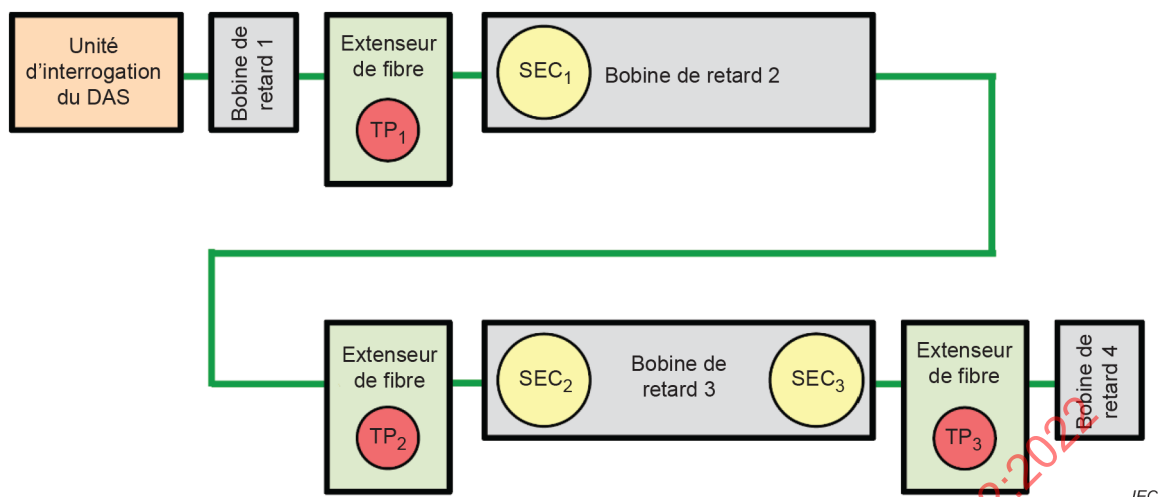
6.5 Bruit propre

6.5.1 Généralités

L'objectif de cet essai est d'évaluer le bruit propre de l'IU.

6.5.2 Montage

La densité spectrale de puissance (PSD) de la réponse au bruit de l'IU doit être mesurée à trois différents emplacements le long du capteur, tel que représenté à la Figure 13, et désignés SEC_1 , SEC_2 et SEC_3 à l'intérieur des deux bobines de retard.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduit avec l'autorisation du SEAFOM.

Figure 13 – Montage pour l'essai de bruit propre

6.5.3 Stimulus

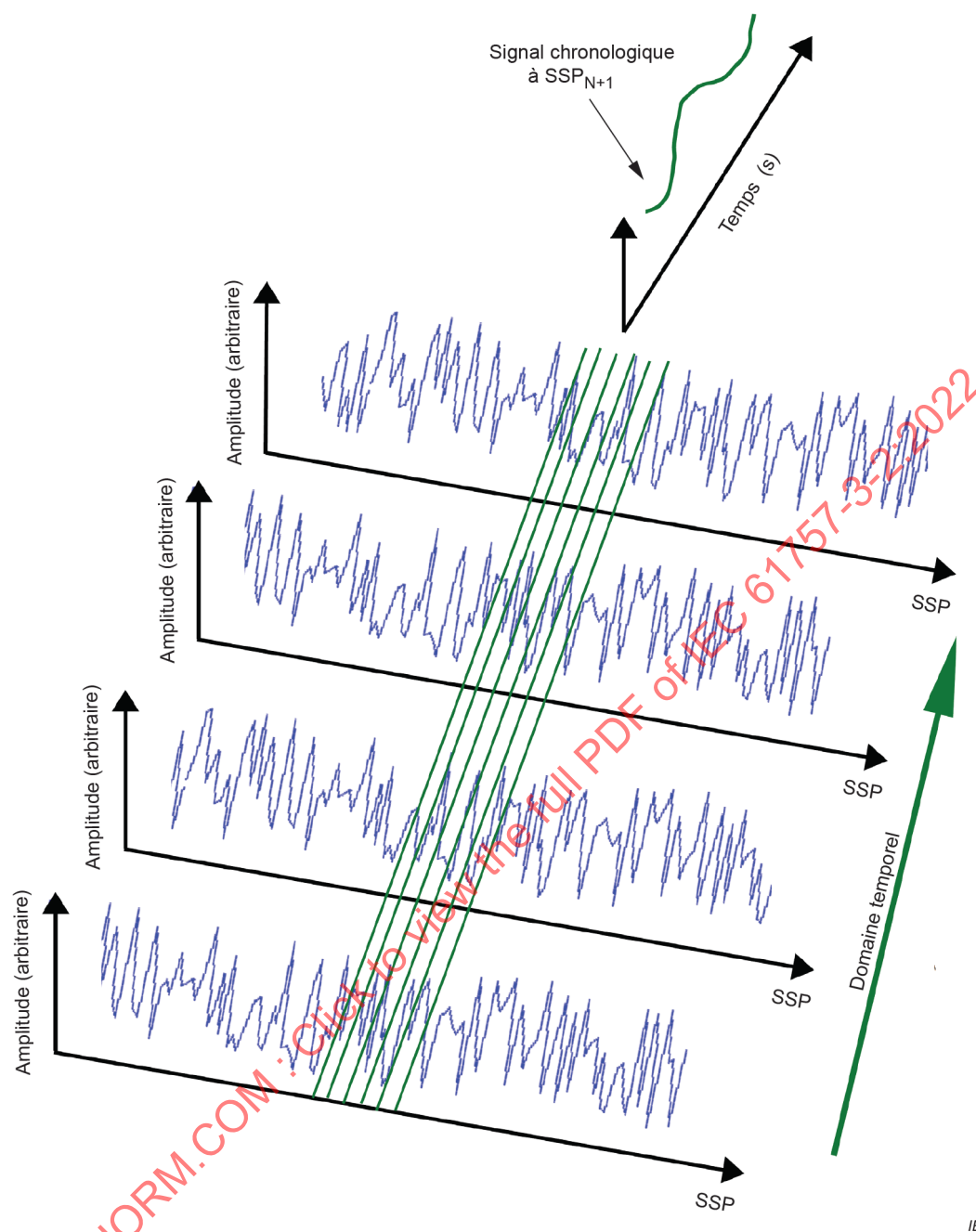
Aucun.

6.5.4 Collecte et traitement des données

6.5.4.1 Généralités

Le DAS doit être monté conformément aux instructions du fabricant, de manière appropriée à la configuration de la fibre avec les paramètres d'interrogation prévus et les mieux adaptés au SFS.

Un ensemble de données d'une durée de 30 s doit être collecté pour les trois sections SEC₁, SEC₂ et SEC₃ (300 SSP contigus par section sont recommandés). L'ensemble de données acquis est un champ 2D représentant le champ acoustique variable dans le temps en fonction de la distance. Il est séparé en deux domaines: le domaine spatial, qui représente la distance le long de la fibre (une série de SSP consécutifs), et le domaine temporel, c'est-à-dire un ensemble de données 1D (série chronologique) pour chaque SSP avec un taux d'échantillonnage égal au taux d'interrogation (voir Figure 14).



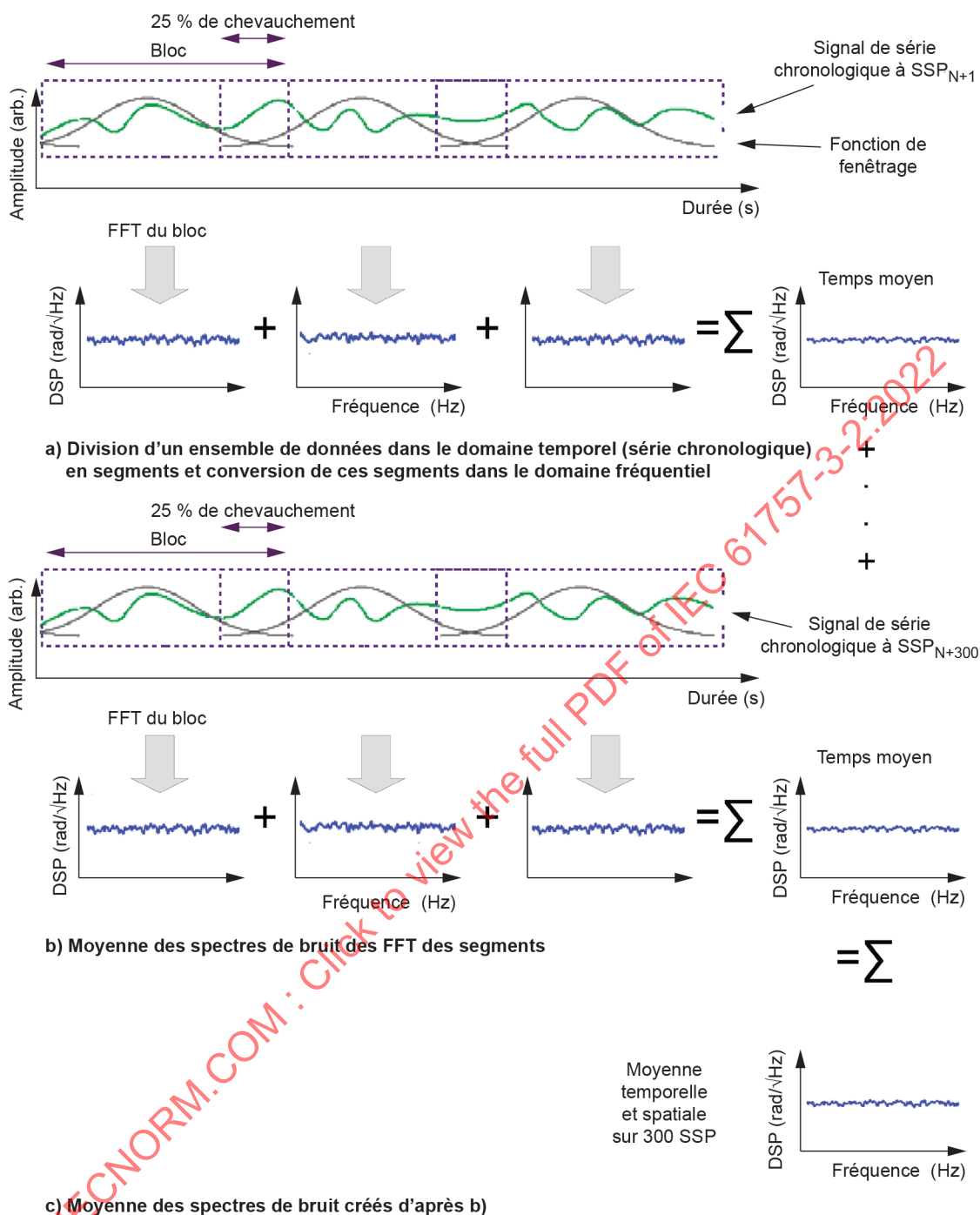
IEC

SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduit avec l'autorisation du SEAFOM.

Figure 14 – Champ de données 2D représentant le champ acoustique variable dans le temps en fonction de la distance

Les données du domaine temporel doivent être traitées comme suit: Prendre tous les ensembles de données du domaine temporel (série chronologique du SSP) et convertir chacun d'entre eux dans le domaine fréquentiel afin de déterminer la densité spectrale moyenne du signal en $\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$, qui doit ensuite être convertie en unités de déformation/ $\sqrt{\text{Hz}}$.

Deux options sont possibles pour traiter les données du domaine temporel. Les deux options sont basées sur la conversion de fréquence par FFT avec une fonction de fenêtrage appropriée (voir l'Annex C). La première option (préférée de certains experts) implique plus d'étapes de calcul que la seconde. Chacune des deux options est acceptable.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduit avec l'autorisation du SEAFOM.

Figure 15 – Représentation schématique du traitement des données du plancher de bruit d'un système

6.5.4.2 Traitement de segments multiples

Pour chaque SSP, il convient de prendre les données dans le domaine temporel et de diviser les enregistrements de 30 s en plusieurs "blocs" qui se chevauchent, chacun ayant une longueur de FFT choisie (voir la Figure 15a)).

Si les longueurs de FFT sont choisies de manière à obtenir une durée de 1 s, la largeur de bande de bruit est automatiquement normée à une bande de bruit de 1 Hz. Il peut y avoir un chevauchement entre les blocs de données, si cela est souhaité.

NOTE Certains experts préconisent un chevauchement de 25 %.

Il convient d'appliquer une fonction de fenêtrage appropriée à la FFT (voir l'Article C.2). De plus, les données résultantes dans le domaine fréquentiel doivent être converties en amplitude et seules les données fréquentielles positives (en dehors de la fréquence de Nyquist) doivent être conservées.

Il convient de calculer la moyenne de tous les blocs de la série chronologique dans chaque SSP (données en unités de $\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$) afin de déterminer une mesure unique de spectre de bruit (voir la Figure 15 b) et la Figure 15 c)). Après le calcul de la moyenne, les données résultantes (en unités de $\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$) doivent être converties en unités de déformation et normées à la résolution spatiale en utilisant la Formule (A.7). Il convient que le résultat couvre trois groupes de 300 ensembles de données de la série chronologique (ou SSP) pour chacune des trois sections SEC_1 , SEC_2 et SEC_3 .

6.5.4.3 Traitement de segments uniques

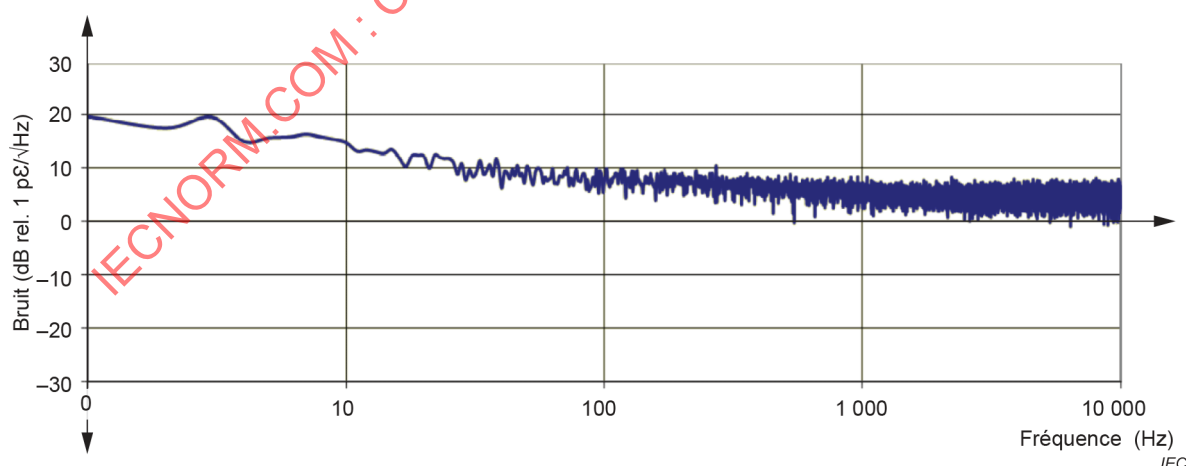
Pour chaque SSP, il convient de choisir une longueur de FFT égale à la série chronologique complète de 30 s.

Il convient d'appliquer une fonction de fenêtrage appropriée à la FFT (voir l'Article C.2). De plus, il convient de convertir les données résultantes dans le domaine fréquentiel en amplitude et de les normer à une largeur de bande de bruit de 1 Hz. Seules les données fréquentielles positives (en dehors de la fréquence de Nyquist) doivent être conservées.

Convertir ensuite les données résultantes (en unités de $\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$) en unités de déformation et les normer à la résolution spatiale en utilisant la Formule (A.7). Le résultat couvre trois groupes de 300 ensembles de données de la série chronologique (ou SSP) pour chacune des trois sections SEC_1 , SEC_2 et SEC_3 .

6.5.5 Rapport de données

Pour chaque section, SEC_1 , SEC_2 et SEC_3 , les données relatives au bruit propre doivent être tracées selon la Figure 16.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduit avec l'autorisation du SEAFOM.

Figure 16 – Exemple de tracé de données relatives au bruit propre

La valeur de résolution spatiale de l'unité d'interrogation doit être consignée dans le rapport des résultats d'essai. Les valeurs de fréquence doivent être présentées en échelle logarithmique et couvrir toute la largeur de bande de l'essai. Les valeurs de bruit doivent être présentées en dB (déformation/ $\sqrt{\text{Hz}}$).

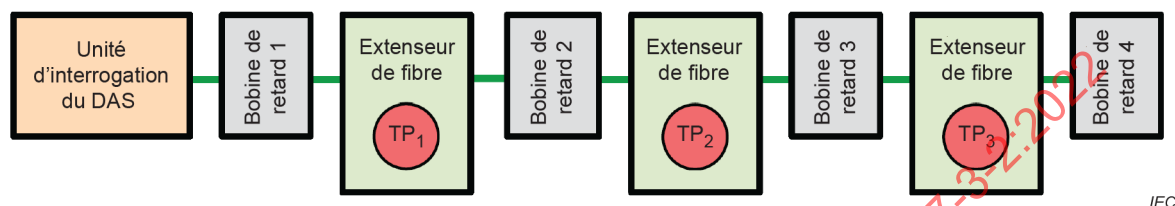
6.6 Résolution spatiale

6.6.1 Généralités

La mesure à effectuer est un contrôle ou une vérification des résolutions spatiales de l'IU spécifiées par le fabricant et porte au moins sur la plus faible résolution spatiale possible.

6.6.2 Montage

La Figure 17 représente le montage qui doit être utilisé pour l'essai de résolution spatiale.



IEC

SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduit avec l'autorisation du SEAFOM.

Figure 17 – Montage pour l'essai de résolution spatiale

L'IU doit être raccordé au SFS (voir 5.1).

6.6.3 Stimulus

Pour mesurer la résolution spatiale, il convient d'utiliser le stimulus suivant:

Type de signal: Sinusoïdal

Fréquence: 2 % de la fréquence de Nyquist

NOTE Si cette fréquence coïncide avec celle du secteur et produit des interférences de ligne, il est admis de faire varier la valeur de la fréquence de ± 20 %.

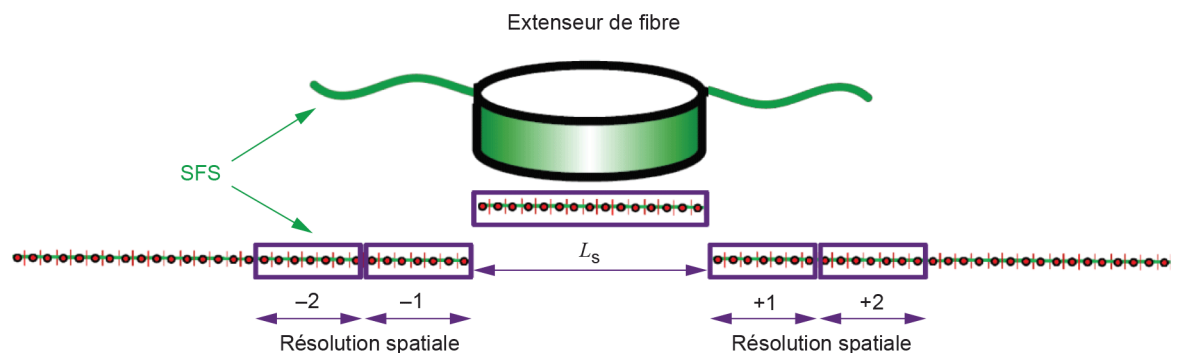
Niveau de signal (valeur de crête): $0,5 \mu\epsilon$ / (résolution spatiale)

Le stimulus doit être appliqué indépendamment à tous les extenseurs de fibre.

6.6.4 Collecte et traitement des données

La collecte et le traitement des données doivent être effectués en appliquant les étapes suivantes:

- un stimulus sinusoïdal doit être appliqué successivement à chaque extenseur de fibre. La fréquence de la stimulation doit être réglée à 100 Hz. L'amplitude doit être fixée à $0,5 \mu\epsilon$ (valeur de crête)/(résolution spatiale). Il n'est pas essentiel que ce niveau de signal soit précisément à $0,5 \mu\epsilon$ /(résolution spatiale), qui est un niveau utile pour obtenir un rapport signal/bruit (SNR) élevé. Le niveau de signal doit être constant pendant toute la durée de l'essai;
- commencer une acquisition de série chronologique sur toute la longueur de fibre du simulateur de capteur. La durée doit être suffisante pour assurer la collecte de "mesures à faible incertitude" (voir l'Annex B) au niveau de tous les SSP;
- convertir les données de la série chronologique de l'IU (en présumant une phase optique ou une autre mesure "linéaire" de l'IU) dans le domaine fréquentiel. Les données de la série chronologique à convertir pour la détermination de la résolution spatiale doivent au minimum couvrir les SSP représentés à la Figure 18.



SOURCE: SEAFOM MSP-02 [1], reproduit avec l'autorisation du SEAFOM.

NOTE Chaque point rouge représente un point de capteur spatial.

Figure 18 – Points échantillons spatiaux à utiliser pour l'évaluation de la résolution spatiale

Il convient d'appliquer cette approche de calcul de la façon suivante:

- 1) Echantillons de données de la série chronologique: 16 384
- 2) Fonction de fenêtrage pour les données: Dessus plat (Article C.1)
- 3) Méthode de conversion de fréquence: FFT

Il convient que chaque FFT se compose de petits blocs afin de pouvoir traiter de nombreux blocs à chaque SSP et d'éliminer la possibilité d'altération des données par des signaux à décroissance progressive. Il convient d'utiliser uniquement les données d'amplitude qui présentent un rapport signal/bruit (SNR) élevé à chaque SSP, tels que ceux identifiés à l'Article B.1;

- d) les données d'amplitude obtenues à la fréquence de stimulus (pics à 100 Hz) pour chaque SSP doivent être enregistrées. Un graphique analogue à celui de la Figure 19 doit ensuite être créé. L'approche de restitution graphique doit être utilisée pour déterminer la résolution spatiale, où l'axe X représente le SSP et l'axe Y la valeur d'amplitude enregistrée. Un ajustement par ligne droite tel que celui représenté à la Figure 19 (ligne rouge) doit être effectué. Les lignes gauche et droite à pente décroissante sont déterminées par l'inclinaison des bords, qui résulte des valeurs respectives à 10 % et 90 % de l'amplitude maximale du signal. La partie centrale de la courbe est déterminée par une droite de régression qui est parallèle à l'axe X et englobe toutes les amplitudes supérieures à 95 % de l'amplitude maximale du signal. Les points d'intersection des trois droites ainsi que les points d'intersection respectifs des lignes gauche et droite à pente décroissante avec l'axe X définissent les points de début et de fin pour L_L et L_R . La Figure 19 représente des données obtenues par simulation numérique avec une résolution spatiale de 5 unités d'échantillon spatial. Cette figure montre deux ensembles de données différents. Le premier "ensemble de données asymétrique" ADS utilise un extenseur de fibre qui a une étendue de 10,5 unités d'échantillon spatial et est asymétrique par rapport aux SSP. Le second "ensemble de données symétrique" SSD utilise un extenseur de fibre qui a une étendue de 11 unités d'échantillon spatial et est symétrique par rapport aux SSP. Les deux ensembles de données sont calculés pour une résolution spatiale de 5 m et présument des performances parfaites de l'IU;
- e) la résolution spatiale doit être estimée comme suit:
 - 1) mesurer les longueurs de l'étendue des lignes gauche et droite à pente décroissante et les nommer L_L et L_R ;
 - 2) la résolution spatiale est estimée égale à $(L_L + L_R)/2$;

NOTE Ces unités sont des unités d'intervalles d'échantillons spatiaux.

- 3) les résolutions spatiales estimées doivent être converties en unités de longueur.