

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Ultrasonics – Hydrophones –
Part 2: Calibration for ultrasonic fields**

**Ultrasons – Hydrophones –
Partie 2: Etalonnage des champs ultrasoniques**

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62127-2:2025



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2025 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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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, graphical symbols and the glossary. 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 22 500 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 25 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, symboles graphiques et le glossaire. 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 22 500 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 25 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Ultrasonics – Hydrophones –
Part 2: Calibration for ultrasonic fields**

**Ultrasons – Hydrophones –
Partie 2: Etalonnage des champs ultrasoniques**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 17.140.50

ISBN 978-2-8327-0091-4

**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.....	8
INTRODUCTION.....	10
1 Scope.....	11
2 Normative references	11
3 Terms and definitions	12
4 List of symbols	21
5 Overview of calibration procedures.....	24
5.1 Principles.....	24
5.2 Summary of calibration procedures.....	25
5.3 Reporting of results.....	26
5.4 Recommended calibration periods	28
6 Generic requirements of a hydrophone calibration system	28
6.1 Mechanical positioning.....	28
6.1.1 General	28
6.1.2 Accuracy of the axial hydrophone position	28
6.1.3 Accuracy of the lateral hydrophone position.....	29
6.2 Temperature measurements and temperature stability	29
6.3 Hydrophone size	29
6.4 Measurement vessel and water properties.....	30
6.5 Measurement of output voltage	30
7 Electrical considerations.....	30
7.1 Signal type.....	30
7.2 Earthing	31
7.3 Measurement of hydrophone output voltage.....	31
7.3.1 General	31
7.3.2 Electrical loading by measuring instrument.....	31
7.3.3 Electrical loading by extension cables	31
7.3.4 Noise.....	32
7.3.5 Cross-talk (radio-frequency rf pick-up) and acoustic interference	32
7.3.6 Integral hydrophone pre-amplifiers	32
8 Preparation of hydrophones.....	32
8.1 General.....	32
8.2 Wetting	32
8.3 Hydrophone support.....	32
8.4 Influence of cable	33
9 Free field reciprocity calibration	33
9.1 General.....	33
9.2 Object.....	33
9.3 General principles.....	33
9.3.1 General	33
9.3.2 Three-transducer reciprocity calibration method	33
9.3.3 Self-reciprocity calibration method	34
9.3.4 Two-transducer reciprocity calibration method	34
9.4 Two-transducer reciprocity calibration method	34
9.4.1 General	34
9.4.2 Auxiliary transducers	34

9.4.3	Reflector.....	35
9.4.4	Measurement field	35
9.4.5	Reciprocity approach	35
9.4.6	Measurement procedure	35
10	Free field calibration by planar scanning.....	35
10.1	General.....	35
10.2	Object.....	36
10.3	General principle	36
10.4	Procedural requirements	38
10.4.1	Hydrophone scanning	38
10.4.2	Power measurement.....	38
10.4.3	Transducer mounting	38
10.4.4	Measurement conditions	38
10.4.5	Measurements	39
10.5	Corrections and sources of uncertainty	39
11	Free field calibration by optical interferometry	39
11.1	General.....	39
11.2	Principle	39
12	Calibration by comparison using a standard hydrophone	39
12.1	General.....	39
12.2	Object.....	39
12.3	Principle	40
12.4	Procedural requirements	40
12.4.1	Source transducer	40
12.4.2	Source transducer drive signal	40
12.4.3	Measurement system.....	40
12.5	Procedure	41
12.5.1	Measurements (Type I): determination of the directional response of a hydrophone	41
12.5.2	Measurements (Type II): calibration by comparison using a standard hydrophone	42
12.6	Maximum hydrophone size.....	42
Annex A (informative)	Assessment of uncertainty in free field calibration of hydrophones.....	43
A.1	General.....	43
A.2	Overall (expanded) uncertainty	43
A.3	Common sources of uncertainty	43
Annex B (informative)	Behaviour of PVDF polymer sensors in high-intensity ultrasonic fields.....	45
B.1	General.....	45
B.2	Theoretical background.....	45
B.3	Tests	45
B.4	Results	46
B.5	Conclusions	47
Annex C (informative)	Electrical loading corrections	48
C.1	General.....	48
C.2	Corrections using complex impedance	48
C.3	Corrections using only capacitances	49

Annex D (informative) Absolute calibration of hydrophones using the planar scanning technique	50
D.1 Overview	50
D.2 Hydrophone scanning methodology	50
D.3 Corrections and sources of measurement uncertainty	51
D.3.1 Total power	51
D.3.2 Received hydrophone signal	51
D.3.3 Integration	52
D.3.4 Directional response	52
D.3.5 Finite size of the hydrophone	53
D.3.6 Noise	53
D.3.7 Nonlinear propagation	54
D.3.8 Planar scanning	55
D.3.9 Intensity proportional to pressure squared	55
D.4 Rationale behind the planar scanning technique for calibrating hydrophones	56
D.4.1 General	56
D.4.2 Relationship between hydrophone and transducer effective radii	56
D.4.3 Justification for $a_t / l \leq 0,5$	56
D.4.4 Derivation of Formula (D.2)	57
D.4.5 Effect of nonlinear propagation, D.3.7	58
Annex E (informative) Properties of water	60
E.1 General	60
E.2 Attenuation coefficient for propagation in water	61
Annex F (informative) The absolute calibration of hydrophones by optical interferometry	62
F.1 Overview	62
F.2 Present position	62
F.2.1 "Magnomic" or nonlinear propagation-based method	62
F.2.2 Optical interferometry	63
F.2.3 High-frequency implementations of optical interferometry	63
Annex G (informative) Waveform concepts	78
G.1 Overview	78
G.2 Temporal waveform, frequency concepts and hydrophone positioning for comparison calibrations of hydrophones	78
G.3 Temporal waveform and frequency coverage concepts	79
G.3.1 Using a narrow-band tone-burst (concept a)	79
G.3.2 Using a broadband waveform resulting from a narrow-band tone-burst after nonlinear propagation (concept b)	80
G.3.3 Using a broadband pulse (concept c)	80
G.3.4 Using a continuous wave frequency sweep with time delay spectrometry (concept d)	81
G.3.5 Continuous wave frequency sweep with TGFA (concept e)	81
G.4 Hydrophone position concepts	81
G.4.1 Near-field hydrophone position (concept A)	81
G.4.2 Far field hydrophone position (concept B)	81
G.4.3 Far field hydrophone position with special reference to a long propagation path in order to achieve nonlinear distortion (concept C)	82
G.4.4 Geometric spherical focus position with focusing source transducer (low voltage or linear excitation) (concept D)	82

G.4.5	Geometric spherical focus position with focusing source transducer and high voltage excitation in order to achieve nonlinear distortion (concept E)	82
G.5	Special considerations for calibrations close to the face of a transducer	83
G.5.1	General requirement	83
G.5.2	Influence of edge waves	83
G.5.3	Potential influence of head waves	84
G.5.4	Treatment of head waves close to the transducer	84
G.5.5	Statements on the usable paraxial plane wave region in the case of a near-field hydrophone position, considering both edge wave and head wave contributions	86
Annex H (informative)	Time delay spectrometry – Requirements and a brief review of the technique	87
H.1	General	87
H.2	Calibration and performance evaluation of ultrasonic hydrophones using time delay spectrometry	87
H.2.1	Ultrasonic field parameter measured	87
H.2.2	Ultrasonic frequency range over which the technique is applicable	87
H.2.3	Ultrasonic field configuration for which the technique is applicable	87
H.2.4	Spatial resolution	88
H.2.5	Sensitivity of the technique	88
H.2.6	Range over which the sensitivity is measured	88
H.2.7	Reproducibility	88
H.2.8	Impulse response	88
H.2.9	Procedure for performing measurements	88
H.3	Measurement procedure for sensitivity intercomparison	89
H.4	Measurement procedure (reciprocity calibration)	89
H.5	Limitations	89
Annex I (informative)	Determination of the phase response of hydrophones	90
I.1	Overview	90
I.2	Coherent time delay spectrometry	91
I.2.1	Principle of operation	91
I.2.2	Example results	91
I.2.3	Uncertainties	92
I.2.4	Limitations	93
I.3	Pulse calibration technique with optical multilayer hydrophone	93
I.3.1	Principle of operation	93
I.3.2	Example of results	93
I.3.3	Uncertainties	94
I.3.4	Limitations	94
I.4	Nonlinear pulse propagation modelling	95
I.4.1	Principle of operation	95
I.4.2	Limitations	95
Annex J (informative)	Maximum size considerations for the active element of a hydrophone	96
J.1	Maximum hydrophone size in the near field case (Annex G – hydrophone position concept A)	96
J.2	Maximum hydrophone size in the far field case (Annex G – hydrophone position concept B)	96

J.3	Maximum hydrophone size in the far field case with special reference to a long propagation path in order to achieve nonlinear distortion (Annex G – hydrophone position concept C).....	96
Annex K (informative)	Two-transducer reciprocity calibration method.....	98
K.1	General.....	98
K.2	Fundamentals of reciprocity	98
K.3	Electrical quantities.....	99
K.4	Diffraction correction and loss due to nonlinear sound propagation	100
K.5	Ultrasonic field	100
K.6	Experimental set-up	101
K.6.1	General	101
K.6.2	Twisting reflector	101
K.6.3	Translational reflector	102
K.6.4	Translational auxiliary transducer	102
K.7	Hydrophone calibration using a calibrated spherically curved auxiliary transducer based on the self-reciprocity method	103
Bibliography		107
Figure F.1	– Experimental set-up of the interferometric foil technique	65
Figure F.2	– End-of-cable open-circuit sensitivity level L_{MC} of a coplanar membrane hydrophone.....	67
Figure F.3	– Experimental set-up of the heterodyne vibrometer technique	69
Figure F.4	– Measured frequency-dependent radial profiles of the acoustic pulse field	71
Figure F.5	– Experimentally determined spatial averaging correction versus frequency for hydrophones of different effective element diameter, d_{eff}	72
Figure F.6	– End-of-cable loaded sensitivity level and sensitivity phase of a coplanar membrane hydrophone assembly at 50 Ω termination	73
Figure F.7	– Hydrophone waveform generated by a 9 μ m coplanar membrane hydrophone positioned at the focus of a 5 MHz transducer (focal length 51 mm).....	74
Figure F.8	– Interferometer displacement waveform generated with the pellicle positioned at the focus of the 5 MHz transducer (focal position 51 mm)	75
Figure F.9	– Frequency spectrum of the displacement waveform (lower curve) and the differentiated displacement waveform (upper curve)	75
Figure F.10	– Sensitivity of a 0,2 mm active element diameter of a 9 μ m bilaminar membrane hydrophone determined at 5 MHz intervals over the frequency range 5 MHz to 60 MHz	76
Figure G.1	– Coordinates of a field point P in the near field of a plane-circular source transducer of radius a_t	84
Figure I.1	– Phase of end-of-cable open-circuit sensitivity for two membrane hydrophones	92
Figure I.2	– Phase of end-of-cable open-circuit sensitivity for a 0,2 mm diameter needle hydrophone	94
Figure K.1	– Experimental set-up with a twisting reflector [22]	102
Figure K.2	– Experimental set-up with a translational reflector [23]	102
Figure K.3	– Experimental set-up with a translational auxiliary transducer [24]	103
Figure K.4	– Relationship of G_C and $\theta_m(^{\circ})$ for several values of ka_h	105

Table 1 – List of typical uncertainty values (for 95 % coverage) obtained by the calibration methods specified in this document and for the frequency range listed	26
Table E.1 – Speed of sound c [54],[55] and specific acoustic impedance, ρc , as a function of temperature, for propagation in water	60
Table G.1 – Temporal waveform and hydrophone position concepts described in Annex G	78
Table I.1 – Example of uncertainties (where a coverage factor, $k = 2$, is used) for a HTDS phase calibration of a needle hydrophone with a diameter of 0,2 mm, expressed at a confidence level of 95 %	92
Table K.1 – Values of the correction coefficient $G_c(ka_h, \theta_m)$ for the spatial average effect of the free-field acoustic pressure over the hydrophone surface if it were removed	105

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62127-2:2025

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ULTRASONICS – HYDROPHONES –**Part 2: Calibration for ultrasonic fields****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) IEC draws attention to the possibility that the implementation of this document may involve the use of (a) patent(s). IEC takes no position concerning the evidence, validity or applicability of any claimed patent rights in respect thereof. As of the date of publication of this document, IEC had not received notice of (a) patent(s), which may be required to implement this document. However, implementers are cautioned that this may not represent the latest information, which may be obtained from the patent database available at <https://patents.iec.ch>. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

IEC 62127-2 has been prepared by IEC technical committee 87: Ultrasonics. It is an International Standard.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 2007, Amendment 1:2013 and Amendment 2:2017. This edition constitutes a technical revision.

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

- a) the upper frequency limit of 40 MHz has been removed;
- b) hydrophone sensitivity definitions have been changed to recognize sensitivities as complex-valued quantities;
- c) directional response measurement and effective size determination procedures have been updated in 12.5.1 to align with recent changes in IEC 62127-3;

- d) Annex F has been amended to comprise a calibration technique for high-frequency complex-valued calibration;
- e) the reciprocity method description in Annex K was extended to also comprise focusing transducers;

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

Draft	Report on voting
87/878/FDIS	87/884/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/publications.

A list of all parts of IEC 62127 series, published under the general title *Ultrasonics – Hydrophones*, can be found on the IEC website.

NOTE Terms in **bold** in the text are defined in Clause 3.

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, or
- revised.

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.

INTRODUCTION

The spatial and temporal distribution of acoustic pressure in an ultrasonic field in a liquid medium is commonly determined using miniature ultrasonic **hydrophones**. These devices are not absolute measurement instruments and it is important that they are calibrated. This part of IEC 62127 specifies the calibration methods to use in determining the response of a **hydrophone** in the ultrasonic range, i.e. above 50 kHz. The main **hydrophone** application in this context lies in the measurement of ultrasonic fields emitted by medical diagnostic equipment in water. It is important to understand **hydrophone** behaviour over a wide frequency band in order to reliably characterize the acoustic parameters of the applied acoustic field. In particular, the frequency range above 15 MHz is important to fully characterize this equipment, primarily due to the increased appearance of high-frequency components in the ultrasonic signals, caused by nonlinear propagation. In addition, the number of medical ultrasonic systems that use frequencies above 15 MHz, particularly intra-operative probes, is growing. It has turned out in recent years that the **hydrophone** response below 0,5 MHz is also important in order to reliably determine the peak-negative (rarefactional) acoustic pressure.

While the term "**hydrophone**" can be used in a wider sense, it is understood here as referring to miniature piezoelectric **hydrophones**. It is this instrument type that is used today in various areas of medical ultrasonics and, in particular, to characterize quantitatively the field structure of medical diagnostic instruments [1]¹. With regard to other pressure sensor types, such as those based on fibre optics, some of the requirements of this document are applicable to these as well but others are not. If in the future these other "**hydrophone**" types gain more importance in field measurement practice, their characteristics and calibration will be dealt with in a future edition of IEC 62127-2 or in a separate part of IEC 62127.

NOTE 1 This document covers the ultrasonic frequency range, from 50 kHz to an upper frequency of 100 MHz. Not all techniques described are applicable to the full frequency range. Standards dealing with **hydrophone** properties (IEC 62127-3) and **hydrophone** use (IEC 62127-1) are being maintained in parallel. This will eventually lead to unified standards covering the whole field of practical **hydrophone** application.

NOTE 2 **Hydrophone** calibration in the lower ultrasonic and in the underwater sound frequency range is particularly addressed in the IEC 60565 series [2],[3].

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

ULTRASONICS – HYDROPHONES –

Part 2: Calibration for ultrasonic fields

1 Scope

This part of IEC 62127 specifies:

- absolute **hydrophone** calibration methods;
- relative (comparative) **hydrophone** calibration methods.

Recommendations and references to accepted literature are made for the various relative and absolute calibration methods in the frequency range covered by this document.

This document is applicable to

- **hydrophones** used for measurements made in water and in the ultrasonic frequency range 50 kHz to 100 MHz;

NOTE 1 Although some physiotherapy medical applications of medical ultrasound are developing which operate in the frequency range 40 kHz to 100 kHz, the primary frequency range of diagnostic imaging remains above 2 MHz. It has recently been established that, even in the latter case, the **hydrophone** response at substantially lower frequencies can influence measurements made of key acoustic parameters [4].

NOTE 2 Calibration methods for underwater acoustics **hydrophones** applicable in the frequency range from 200 Hz to 1 MHz are available in IEC 60565-1 [2], and for frequencies from 0,01 Hz to several kilohertz in IEC 60565-2 [3].

- **hydrophones** employing piezoelectric sensor elements, designed to measure the pulsed wave and continuous wave ultrasonic fields generated by ultrasonic equipment;

NOTE 3 Some **hydrophones** can have non-circular active elements, arising from slight deviations from a circular structure caused, for example, by electrode structure; or, conversely, the active elements can actually be squares. It is important in these cases to pay special attention to the **directional response** and to the effective radii of the active element through various axes of rotation.

- **hydrophones** with or without a **hydrophone** pre-amplifier.

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 61161, *Ultrasonics – Power measurement – Radiation force balances and performance requirements*

IEC 61689, *Ultrasonics – Physiotherapy systems – Field specifications and methods of measurement in the frequency range 0,5 MHz to 5 MHz*

IEC 62127-1, *Ultrasonics – Hydrophones – Part 1: Measurement and characterization of medical ultrasonic fields*

IEC 62127-3:2022, *Ultrasonics – Hydrophones – Part 3: Properties of hydrophones for ultrasonic fields*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 62127-1, IEC 62127-3 and the following apply.

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

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

3.1

acoustic centre

point on or near a transducer from which the spherically divergent sound waves emitted by the transducer, and observable at remote points, appear to diverge

Note 1 to entry: This point is the boundary between the **near field** and the **far field**.

Note 2 to entry: In this region, the sound field has plane wave fronts changing to spherical wave fronts with divergence.

3.2

beam axis

straight line that passes through the **beam centrepoints** of two planes perpendicular to the line which connects the point of maximal **pulse-pressure-squared integral** with the centre of the **external transducer surface**

Note 1 to entry: The location of the first plane is the location of the plane containing the maximum **pulse-pressure-squared integral** or, alternatively, is one containing a single main lobe which is in the focal Fraunhofer zone. The location of the second plane is as far as is practicable from the first plane and parallel to the first with the same two orthogonal scan lines (x and y axes) used for the first plane.

Note 2 to entry: In a number of cases, the term **pulse-pressure-squared integral** is replaced in the above definition by any linearly related quantity, for example

- a) in the case of a continuous wave signal the term **pulse-pressure-squared integral** is replaced by mean square acoustic pressure as defined in IEC 61689,
- b) in cases where signal synchronization with the scanframe is not available the term **pulse-pressure-squared integral** may be replaced by **temporal average intensity**.

Note 3 to entry: See IEC 62127-1:2022, Figure 1.

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.8, modified – In the definition, "aperture" has been replaced with "surface".]

3.3

beam centrepoint

position determined by the intersection of two lines in the same beam area plane xy passing through the **beamwidth midpoints** of two orthogonal planes, xz and yz , perpendicular to their respective **beamwidth** lines

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.9]

3.4 beamwidth

w_6 , w_{12} , w_{20}

greatest distance between two points on a specified axis perpendicular to the **beam axis** where the **pulse-pressure-squared integral** falls below its maximum on the specified axis by a specified amount

Note 1 to entry: In a number of cases, the term **pulse-pressure-squared integral** is replaced in the above definition by any linearly related quantity, for example

- a) in the case of a continuous wave signal the term **pulse-pressure-squared integral** is replaced by mean square acoustic pressure as defined in IEC 61689,
- b) in cases where signal synchronization with the scanframe is not available the term **pulse-pressure-squared integral** may be replaced by **temporal average intensity**.

Note 2 to entry: Commonly used **beamwidths** are specified at –6 dB, –12 dB and –20 dB levels below the maximum. The decibel calculation implies taking 10 times the logarithm of the ratios of the integrals.

Note 3 to entry: **Beamwidth** is expressed in metres (m).

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.11]

3.5 beamwidth midpoint

linear average of the location of the centres of **beamwidths** in a plane

Note 1 to entry: The average is taken over as many **beamwidth** levels as given in IEC 61828:2020, Clause C.2 and Table C.2.

[SOURCE: IEC 61828:2020 [5], 3.22]

3.6 beam centre

point in a plane in the **far field**, usually perpendicular to the **beam axis**, at which the **spatial-peak temporal-peak acoustic pressure** occurs

3.7 derived instantaneous intensity

quotient of squared **instantaneous acoustic pressure** and characteristic acoustic impedance of the medium at a particular instant in time at a particular point in an acoustic field

$$I(t) = \frac{p(t)^2}{\rho c} \quad (1)$$

where:

$p(t)$ is the **instantaneous acoustic pressure**;

ρ is the density of the medium;

c is the speed of sound in the medium.

Note 1 to entry: For measurement purposes referred to in this document, the **derived instantaneous intensity** is an approximation of the **instantaneous intensity**.

Note 2 to entry: Increased **uncertainty** is expected to be taken into account for measurements very close to the transducer.

Note 3 to entry: **Derived instantaneous intensity** is expressed in units of watt per metre squared (W/m²).

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.14]

3.8

diametrical beam scan

set of measurements of the **hydrophone** output voltage made while moving the **hydrophone** in a straight line passing through a point on the **beam axis** and in a direction normal to the **beam axis**

Note 1 to entry: The **diametrical beam scan** can extend to different distances on either side of the **beam axis**.

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.15]

3.9

directional response

description of the response of a **hydrophone**, as a function of direction of propagation of the incident plane sound wave, in a specified plane through the **reference centre** and at a specified frequency

Note 1 to entry: Although **directional response** is a complex-valued function, it is generally the modulus of **directional response** that is of most interest and this is commonly presented graphically.

[SOURCE: IEC 62127-3:2022, 3.2]

3.10

effective hydrophone size

a_h

size of a theoretical receiver **hydrophone** that has a predicted **directional response** function with an angular width equal to the observed angular width

Note 1 to entry: The size is usually the function of frequency. For representative experimental data, see [9].

Note 2 to entry: The **effective hydrophone size** is expressed in metres (m).

Note 3 to entry: For **hydrophones** with a circular geometry, the **effective hydrophone size** is a radius.

Note 4 to entry: For **hydrophones** with a rectangular geometry, the **effective hydrophone size** is half the greatest value of the length or width.

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.20]

3.11

effective radius of a non-focusing ultrasonic transducer

a_t

radius of a perfect disc piston-like ultrasonic source transducer that has a predicted axial acoustic pressure distribution approximately equivalent to the observed axial acoustic pressure distribution over an axial distance until at least the last axial maximum has passed

Note 1 to entry: The **effective radius of a non-focusing ultrasonic transducer** is expressed in metres (m).

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.21]

3.12

effective wavelength

λ_{eff}

longitudinal speed of sound in the propagation medium divided by the acoustic-working frequency

Note 1 to entry: The **effective wavelength** is expressed in metres (m).

Note 2 to entry: Application dependent definitions of the acoustic-working frequency are given in IEC 62127-1:2022.

[SOURCE: IEC 61828:2020 [5], 3.46, modified – Note 2 to entry has been added.]

3.13**electric load impedance** $\underline{Z}_L$

complex electric input impedance (consisting of a real and an imaginary part) to which the **hydrophone** unit output cable is connected or is intended to be connected

Note 1 to entry: The **electric load impedance** is expressed in ohms (Ω).

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.22]

3.14**end-of-cable loaded sensitivity** $\underline{M}_L(f)$

<of a **hydrophone** or **hydrophone assembly**> quotient of the Fourier transformed **hydrophone** voltage-time signal $F(u_L(t))$ at the end of any integral cable or output connector of a **hydrophone** or **hydrophone assembly**, when connected to a specified **electric load impedance**, to the Fourier transformed **acoustic pulse waveform** $F(p(t))$ in the undisturbed **free field** of a plane wave in the position of the **reference centre** of the **hydrophone** if the **hydrophone** were removed

$$\underline{M}_L(f) = \frac{F(u_L(t))}{F(p(t))} \quad (2)$$

Note 1 to entry: The **end-of-cable loaded sensitivity** is a complex-valued parameter. Its modulus is expressed in units of volt per pascal (V/Pa), its phase angle is expressed in degrees, and represents the phase difference between the electrical voltage and the sound pressure.

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.25]

3.15**end-of-cable loaded sensitivity level** $L_{M_L}(f)$

<of a **hydrophone** or **hydrophone assembly**> twenty times the logarithm to the base 10 of the quotient of the modulus of the **end-of-cable loaded sensitivity** $|\underline{M}_L(f)|$ to a reference sensitivity M_{ref}

$$L_{M_L}(f) = 20 \log_{10} \frac{|\underline{M}_L(f)|}{M_{\text{ref}}} \text{ dB} \quad (3)$$

Note 1 to entry: Commonly used values of the reference sensitivity M_{ref} are 1 V/ μ Pa or 1 V/Pa.

Note 2 to entry: The **end-of-cable loaded sensitivity level** is expressed in decibels (dB).

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.26]

3.16

end-of-cable open-circuit sensitivity

$\underline{M}_c(f)$

<of a **hydrophone**> quotient of the Fourier transformed **hydrophone** open-circuit voltage-time signal $F(u_c(t))$ at the end of any integral cable or output connector of a **hydrophone** to the Fourier transformed **acoustic pulse waveform** $F(p(t))$ in the undisturbed **free field** of a plane wave in the position of the **reference centre** of the **hydrophone** if the **hydrophone** were removed

$$\underline{M}_c(f) = \frac{F(u_c(t))}{F(p(t))} \quad (4)$$

Note 1 to entry: The **end-of-cable open-circuit sensitivity** is a complex-valued parameter. Its modulus is expressed in units of volt per pascal (V/Pa), its phase angle is expressed in degrees, and represents the phase difference between the electrical voltage and the sound pressure.

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.27]

3.17

external transducer surface

external transducer aperture

part of the surface of the **ultrasonic transducer** or **ultrasonic transducer element group** assembly that emits ultrasonic radiation into the propagation medium

Note 1 to entry: This surface is assumed to be accessible for measurements using a **hydrophone** in a chosen propagation medium (usually water).

Note 2 to entry: This surface is either directly in contact with the patient or is in contact with a water or liquid path to the patient.

Note 3 to entry: See IEC 61828:2020 [5], Figure B.5.

[SOURCE: IEC 61828:2020 [5], 3.52]

3.18

far field

region of the field where $z > z_T$ aligned along the **beam axis** for planar non-focusing transducers

Note 1 to entry: In the **far field**, the sound pressure appears to be spherically divergent from a point on or near the radiating surface. Hence, the pressure produced by the sound source is approximately inversely proportional to the distance from the source.

Note 2 to entry: The term "**far field**" is used in this document only in connection with non-focusing source transducers. For focusing transducers, a different terminology for the various parts of the transmitted field applies (see IEC 61828 [5]).

Note 3 to entry: If the shape of the transducer aperture produces several **transition distances**, the one furthest from the transducer is used.

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.30]

3.19

free field

sound field in a homogeneous and isotropic medium in which the effects of boundaries are negligible

[SOURCE: IEC 60565:2006, 3.13]

3.20

hydrophone

transducer that produces electric signals in response to pressure fluctuations in water

Note 1 to entry: A **hydrophone** is principally a passive device designed and built to respond to sound pressure.

Note 2 to entry: In some applications, a **hydrophone** is used as an active device to transmit sound.

[SOURCE: IEC 60050-801:2021 [6], 801-32-26]

3.21

hydrophone assembly

combination of **hydrophone** and **hydrophone pre-amplifier**

[SOURCE: IEC 62127-3:2022, 3.13]

3.22

hydrophone axis

nominal symmetry axis of the **hydrophone** active element

Note 1 to entry: Unless stated otherwise (explicitly and quantitatively) by the manufacturer, it is understood for the purposes of this document that this is given by the apparent geometrical symmetry axis of the **hydrophone**.

[SOURCE: IEC 62127-3:2022, 3.14]

3.23

hydrophone geometrical size

geometrical size of a hydrophone active element

a_g

size defined by the lateral extents of the active element of a **hydrophone**

Note 1 to entry: The **hydrophone geometrical size** is expressed in metres (m).

Note 2 to entry: For **hydrophones** with a circular geometry, the **hydrophone geometrical size** is a radius.

Note 3 to entry: For **hydrophones** with a rectangular geometry, the **hydrophone geometrical size** is a half the greater value of the length or width.

Note 4 to entry: For fibre optic **hydrophones**, the **hydrophone geometrical size** is the radius of the light spot at the tip of the fibre.

[SOURCE: IEC 62127-3:2022, 3.11, modified – Note 4 to entry has been added.]

3.24

hydrophone pre-amplifier

active electronic device connected to, or intended to be connected to, a particular **hydrophone** and reducing its output impedance

Note 1 to entry: A **hydrophone pre-amplifier** requires a supply voltage (or supply voltages).

Note 2 to entry: The **hydrophone pre-amplifier** can have a forward voltage transmission factor of less than one, i.e. it need not necessarily be a voltage amplifier in the strict sense.

[SOURCE: IEC 62127-3:2022, 3.15]

3.25

instantaneous acoustic pressure

$$p(t)$$

pressure at a particular instant in time and at a particular point in an acoustic field, minus the ambient pressure

Note 1 to entry: **Instantaneous acoustic pressure** is expressed in pascals (Pa).

[SOURCE: IEC 60050-802:2011 [7], 802-01-03, modified – Note 1 to entry has been added.]

3.26

instantaneous intensity

$$I(t)$$

acoustic energy transmitted per unit time in the direction of acoustic wave propagation per unit area normal to this direction at a particular instant in time and at a particular point in an acoustic field

Note 1 to entry: **Instantaneous intensity** is the product of **instantaneous acoustic pressure** and particle velocity. It is difficult to measure intensity in the ultrasound frequency range. For the measurement purposes referred to in this document and under conditions of sufficient distance from the **external transducer surface** (at least one transducer diameter, or an equivalent transducer dimension in the case of a non-circular transducer) the **instantaneous intensity** can be approximated by the **derived instantaneous intensity**.

Note 2 to entry: **Instantaneous intensity** is expressed in units of watt per metre squared (W/m^2).

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.36]

3.27

longitudinal plane

plane defined by the **beam axis** and a specified orthogonal axis

Note 1 to entry: See IEC 62127-1:2022, Figure 1.

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.39]

3.28

near field

region of the field where $z < z_T$ aligned along the **beam axis** for planar non-focusing transducers

Note 1 to entry: For circular planar transducers, this is at a distance less than $A_{ob}/\pi\lambda$, where A_{ob} is the **output beam area** and λ is the **wavelength** of the ultrasound corresponding to the **acoustic frequency**.

Note 2 to entry: If the shape of the transducer aperture produces several **transition distances**, the one closest to the transducer is used.

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.41].

3.29

reference centre

point on or near a **hydrophone** about which its acoustic receiving sensitivity is defined

Note 1 to entry: Unless stated otherwise (explicitly and quantitatively) by the manufacturer, it is understood for the purposes of this document that this is given by the geometrical centre of the front surface of the **hydrophone** active element.

[SOURCE: IEC 62127-3:2022, 3.16]

3.30**source aperture plane**

closest possible measurement plane to the **external transducer surface** plane that is perpendicular to the **beam axis**

Note 1 to entry: If the offset distance is zero, the **source aperture plane** can be coincident with the **external transducer surface** plane.

Note 2 to entry: See Figure B.5, Figure B.7, Figure B.9 and Figure B.10 in IEC 61828:2020 [5].

[SOURCE: IEC 61828:2020 [5], 3.135].

3.31**source aperture width**
 L_{SA}

<in a specified **longitudinal plane**> greatest –20 dB **beamwidth** along the line of intersection between the designated **longitudinal plane** and the **source aperture plane**

Note 1 to entry: See Figure B.5 and Figure B.6b in IEC 61828:2020 [5].

Note 2 to entry: **Source aperture width** is expressed in metres (m).

[SOURCE: IEC 61828:2020 [5], 3.136, modified – two Notes to entry on HITU transducers have been omitted.].

3.32**transducer aperture width**
 L_{TA}

full width of the transducer aperture along a specified axis orthogonal to the **beam axis** of the unsteered beam at the centre of the transducer

Note 1 to entry: See Figure 3 in IEC 62127-1:2022.

Note 2 to entry: **Transducer aperture width** is expressed in metres (m).

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.81].

3.33**transition distance**
 z_T

aperture area divided by π times the **effective wavelength** λ_{eff}

[SOURCE: IEC 61828:2020 [5], definition 3.153, modified – In the definition, the words "the **effective wavelength**" have been added and a subscript has been added to the symbol for **effective wavelength**.]

3.33.1**transition distance for design**
 z_{TD}

for a given **longitudinal plane**, the **transducer aperture area** A_{TA} of the **ultrasonic transducer** divided by π times the **effective wavelength** λ_{eff}

$$z_{TD} = A_{TA} / (\pi \lambda_{\text{eff}}) \quad (5)$$

Note 1 to entry: For design, for an unapodized ultrasonic transducer with circular symmetry about the **beam axis**, the source aperture area is πa_e^2 , where a_e is the effective radius; therefore the **transition distance** is $z_T = a_e^2 / \lambda_{\text{eff}}$.

Note 2 to entry: For a spherically focusing transducer, the **transition distance** is approximately the same but more exactly it is $z_T = 2D^2 \left(1 - \sqrt{1 - (a/D)^2} \right) / \lambda_{\text{eff}}$ where D is the radius of curvature.

Note 3 to entry: For design, for an unapodized rectangular **ultrasonic transducer** which has a **transducer aperture width**, L_{TA1} , in a specified **longitudinal plane**, the effective in-plane area is $(L_{TA1})^2$. Therefore, for this plane, the **transition distance** is $z_{T1} = (L_{TA1})^2 / (\pi \lambda_{\text{eff}})$. The **transition distance** for the orthogonal **longitudinal plane** including the second **transducer aperture width** is $z_{T2} = (L_{TA2})^2 / (\pi \lambda_{\text{eff}})$.

Note 4 to entry: For apodized transducers with a symmetric even **apodization** or weighting function W (normalized to a maximum value of one for the particle velocity distribution), the **transition distances** are the following.

For circularly symmetric transducers with an active radius a : $z_T = \left(\frac{2}{\lambda} \right) \int_0^a W(r) r dr$

For a rectangular transducer with a physical aperture length L in a given **longitudinal plane**, for example, xz :

$$z_T = \left(\frac{4}{\pi \lambda_{\text{eff}}} \right) \left| \int_0^{L/2} W(x) dx \right|^2$$

Note 5 to entry: For symmetric shapes other than the most common cases of circular symmetry and rectangular geometry, the same definition of **transition distance** can be used. For example, for apertures with n -fold symmetry ($n > 2$) such as hexagons and octagons, the **transition distance** in a symmetry plane perpendicular to a side is equal to the area of the aperture divided by $(\pi \lambda_{\text{eff}})$. For annular arrays with several rings, the equivalent area is the total (all rings) area of the active aperture. For cases in which unique phasing is used such as annular arrays with alternate phase shifts (0° or 180°) in addition to intended focusing or for cases of apertures with unusual shapes and phasing, three-dimensional diffraction computation is employed to determine the minimum **beamwidth** corresponding to the appropriate **transition distance**.

Note 6 to entry: **Transition distance for design** is expressed in metres (m).

[SOURCE: IEC 61828:2020 [5], 3.153.1, modified – A subscript has been added to the symbol for **effective wavelength** and Note 6 to entry has been omitted.]

3.33.2 transition distance for measurement

z_{TM}

for a given **longitudinal plane**, the **source aperture area**, A_{SAeff} , of the **ultrasonic transducer** divided by π times the **effective wavelength** λ_{eff}

$$z_{\text{TM}} = A_{\text{SAeff}} / (\pi \lambda_{\text{eff}}) \quad (6)$$

Note 1 to entry: For measurements in each specified **longitudinal plane**, the **source aperture width** in that plane is used, or $z_{T1} = (L_{\text{SA1}})^2 / (\pi \lambda_{\text{eff}})$; in the other orthogonal plane, $z_{T2} = (L_{\text{SA2}})^2 / (\pi \lambda_{\text{eff}})$.

Note 2 to entry: **Transition distance for measurement** is expressed in metres (m).

[SOURCE: IEC 61828:2020 [5], 3.153.2, modified – A subscript has been added to the symbol for **effective wavelength**.]

3.34 uncertainty

parameter, associated with the result of a measurement, that characterizes the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the measurand

Note 1 to entry: See ISO/IEC Guide 98-3:2008 [10], 2.2.3.

3.35**wavelength** λ

distance in the direction of propagation of a periodic wave between two successive positions at which the phase is the same

Note 1 to entry: The **wavelength** is expressed in metres (m).

[SOURCE: IEC 60050-845:2020 [8], 845-21-025, modified – Notes 1, 2, 3, 5 and 6 to entry have been omitted. Note 4 to entry has been renumbered Note 1 to entry and "or decimal submultiples of metre" has been deleted.]

4 List of symbols

a_g	hydrophone geometrical size
a_h	effective hydrophone size
$a_{\max}$	maximum effective radius for a specific hydrophone application
a_p	lateral distance from the beam axis ($a_{p\max E}$, $a_{p\max H}$: maximum values with respect to avoiding edge wave and head wave interference, respectively)
a_t	effective radius of a non-focusing ultrasonic transducer
A_g	geometrical area of an ultrasonic transducer
B/A	Fox-Wallace nonlinearity parameter
c	speed of sound in a medium (usually water)
C_H	end-of-cable capacitance of the hydrophone including any integral cable and connector
d_1	distance between the auxiliary transducer and the reflector measured along the axis of symmetry
d_h	distance between the auxiliary transducer and the active element of the hydrophone measured along the axis of symmetry
d_m	distance between the auxiliary transducer and the last minimum of the acoustic pressure amplitude along the axis of symmetry of the auxiliary transducer
$D(\theta)$	normalized directional response function
e	base of natural logarithms
f	frequency
f_f	fundamental drive frequency of a signal used to generate nonlinear distortion
f_u	upper frequency limit of the stated frequency band of a hydrophone
F	geometric focal length of a focusing transducer
G_{th}	correction that accounts for the diffraction in the propagation field and is related to the waveform generation by the transducer and the reception by the hydrophone
G_{tt}	correction that accounts for the diffraction in the propagation field and is related to the generation and the reception by the transducer
i	imaginary unit
I_p	magnitude of the instantaneous intensity assuming proportionality with acoustic pressure squared
I_{sc}	current measured over a short circuit jumper replacing the transducer
I_t	transmitting current driven to a transducer

$\vec{I}(x,y,z,t)$	instantaneous intensity vector at the point (x,y,z) at time t
$I(x,y,z,t)$	component of the instantaneous intensity vector in the propagation direction at the point (x,y,z) at time t
$j_{\max}$	the number of the farthest scan point in a radial scan
J_p	reciprocity coefficient for plane waves
k	circular wave number ($= 2\pi/\lambda$)
L_{SA}	source aperture width
L_{TA}	transducer aperture width
$L_{M_L}(f)$	end-of-cable loaded sensitivity level
$L_{M_c}(f)$	end-of-cable open-circuit sensitivity level
$\underline{M}$	general symbol for the complex hydrophone sensitivity, $M = \underline{M} $ being its modulus and $\arg(\underline{M})$ being its argument ($=$ phase angle)
$\underline{M}_c(f)$	end-of-cable open-circuit sensitivity
$\underline{M}_L(f)$	end-of-cable loaded sensitivity
M_t^*	apparent receiving voltage response of an auxiliary transducer
N_{av}	number of waveform averages taken to generate a time-averaged voltage waveform
N	number of diametrical samples
N_{harm}	harmonic number
p_0	pressure amplitude
p_1	acoustic pressure amplitude at the face of a transducer
p_a	acoustic pressure generated by a transducer at its surface
p_i	acoustic pressure incident on a transducer surface
p_h	acoustic pressure incident on the hydrophone surface
$p(x,y,z,t)$	instantaneous acoustic pressure at the point (x,y,z) at time t
$P(l)$	total ultrasonic power passing through a plane of infinite extent in an acoustic field at a distance l from an ultrasonic transducer
P_o	total ultrasonic power emitted by a transducer
rf	radio-frequency signals
r	distance from the ultrasonic beam centre to a scan point
R	$(l\lambda / \pi a_1^2)$ normalized distance between a transducer and a hydrophone in terms of the Rayleigh distance $(\pi a_1^2 / \lambda)$
R_{RT}	amplitude reflection coefficient for the reflector–water interface
R_{1i}, R_{2i}	distances from the beam centre to the extremes of the i th diametrical beam scan
s	distance from the ultrasonic beam centre to the nearest scan point
S_t^*	apparent transmitting current response of an auxiliary transducer
t_H	arrival time of the nearest head wave
t_{TDS}	time available for a free field measurement in time delay spectrometry

T	acoustic transmission factor
$\underline{T}(f)$	complex-valued acoustic transmission factor in the frequency domain
U_{load}	voltage measured with the transducer coupled to the system
$U_L(x,y,z,t)$	end-of-cable voltage for a hydrophone with the hydrophone at the reference point (x,y,z) and at time t
$U_L'(x,y,z,t)$	end-of-cable voltage for a hydrophone including noise with the hydrophone at the reference point (x,y,z) and at time t
$U_n(x,y,z)$	root-mean-square (RMS) noise level measured with a hydrophone at the reference point (x,y,z)
U_t	voltage generated by a transducer in the receiving mode
U_T	voltage at the terminals of an ultrasonic transducer
$\vec{v}(x,y,z,t)$	Instantaneous particle velocity vector at the point (x,y,z) at time t
v_t	speed of a radial wave in a transducer plate
w_f	beamwidth of the fundamental-frequency field component
z	axial distance between a hydrophone and an ultrasonic transducer surface. (z_1 , z_2 , z_3 and z_4 are special distance values in accordance with certain criteria involving edge waves and head waves)
z_{min}	minimum distance for a finite size hydrophone from a transducer
z_{pf}	distance of the pressure focus from a focusing transducer
Z_{RT}	characteristic acoustic impedance of the reflector
z_T	transition distance
z_{TD}	transition distance for design
z_{TM}	transition distance for measurement
Δz	distance difference
Z_h	complex electric output impedance of a hydrophone
Z_L	complex electric load impedance
α	amplitude attenuation coefficient of plane waves in a medium (usually water)
β	nonlinearity parameter in the sense of $\beta = 1 + B/(2A)$
δ	amplitude of the second harmonic expressed as a percentage of the acoustic pressure at the fundamental frequency
δ_{av}	pressure amplitude correction for finite hydrophone size
θ	angle between the ultrasonic propagation direction and the z -axis, equivalent to the angle between the line joining the centre of the ultrasonic transducer and the centre of the hydrophone and the propagation direction
θ_1	angle between the line joining the centre of the ultrasonic transducer to the centre of the hydrophone and the direction of maximum sensitivity of the hydrophone
γ	ratio of beam radius to the effective hydrophone radius
ζ	acoustic displacement as measured by an optical interferometer
θ	angle of incidence of an ultrasonic wave with respect to the hydrophone axis
λ	wavelength
λ_{eff}	effective wavelength

λ_l	optical wavelength ; wavelength of light in vacuum
ζ	$\pi/2$ times the Rayleigh length (a_t^2/λ , see IEC 61828 [5]) of a focusing transducer
ρ	(mass) density of the measurement liquid (water)
ρc	characteristic acoustic impedance of the measurement liquid (water)
σ	nonlinear distortion parameter
σ_q	local distortion parameter
τ	pulse duration or burst duration ($\tau_{\max E}$, $\tau_{\max H}$: maximum values with respect to avoiding edge wave and head wave interference, respectively)
ω	circular frequency

5 Overview of calibration procedures

5.1 Principles

Hydrophones are required for absolute measurements of the properties of an acoustic field. The time-dependent voltage output from a **hydrophone**, $u(t)$, can be presented in the form:

$$u(t) = p(t) * m(t) \quad (7)$$

where

$p(t)$ is the pressure waveform;

$*$ is a convolution;

$m(t)$ is the impulse response of the **hydrophone**.

Viewed in the Fourier domain, if $\underline{U}(f)$, $\underline{P}(f)$ and $\underline{M}(f)$ are the respective Fourier transforms, then the resultant voltage spectrum, $\underline{U}(f)$, is equal to $\underline{P}(f) \times \underline{M}(f)$. The quantity $\underline{M}(f)$ is the **hydrophone** transfer function (sensitivity) and its complex value comprises both real and imaginary components.

In the past, ultrasonic **hydrophones** have been applied almost exclusively as amplitude sensors. A change has become apparent in recent years, and it is increasingly considered useful to have additional phase information. Some **hydrophone** calibration procedures have been extended to cover the determination of phase characteristics. IEC 62127-1:2022 partly relies on phase information for **hydrophones** within waveform deconvolution applications. However, the **hydrophone** measurement standard also provides a method for phase response retrieval from sensitivity modulus data as an alternative to phase response calibration. A summary of current capability for (relative) phase measurement is provided in Annex I and a method for full complex-valued calibration in F.2.3.2.

Procedures for the calibration of **hydrophones** are specified using the following principles:

a) calibration using a standard transducer.

A **hydrophone** can be calibrated by comparison with a standard transducer utilized as a source of ultrasonic power. The output power of the transducer shall be determined using radiation force balance techniques as given in IEC 61161;

b) calibration without using a standard transducer.

This type of calibration covers:

1) reciprocity calibration

A calibration based upon the reciprocity principle, in which at least one transducer is a reciprocal transducer;

2) physical calibration

A calibration in which the sound pressure at the **hydrophone** is calculated from the measurement of a physical parameter related to the acoustic field, such as acoustic displacement (e.g. optical interferometry).

NOTE "Absolute" **hydrophone** calibration is understood here in the sense of "without reference to another **hydrophone**". This is sometimes also referred to as "primary" calibration. On the other hand, **hydrophones** are often calibrated in practice following a "secondary" or "substitution" procedure, which means a sensitivity comparison with a calibrated reference **hydrophone**. The reference **hydrophone** itself can have been calibrated in "absolute" terms or against another reference **hydrophone**, and so on. Obviously, there are two different fundamental procedures: to perform an absolute **hydrophone** calibration and to compare the sensitivity of two **hydrophones**. Clause 9, Clause 10, and Clause 11, and Annex D, Annex F and Annex H deal with the former procedure. The latter procedure is dealt with in detail in Clause 12. Note that a substitution calibration usually involves both steps and that the user is expected to refer to both Clause 12 and the other clauses dealing with absolute calibration (and that **uncertainties** from both fundamental steps contribute to the final calibration **uncertainty** in the case of a substitution calibration).

5.2 Summary of calibration procedures

The appropriate frequency ranges of the various methods that can be used to calibrate ultrasonic **hydrophones** are given below, with a reference to the clause that specifies the relevant method. Table 1 provides a tabulation of the typical achievable calibration **uncertainty**.

a) **Free field** reciprocity calibration (Clause 9)

- Calibration without a standard transducer in a **free field**, between 50 kHz and 15 MHz.

b) **Free field** calibration by planar scanning (Clause 10)

- Calibration with a standard transducer in a **free field**, between 500 kHz and 15 MHz.

c) **Free field** calibration by optical interferometry (Clause 11)

- Physical calibration carried out through a **free field** measurement of the acoustic displacement, between 200 kHz and 100 MHz.

d) Calibration by comparison using a standard **hydrophone** (Clause 12)

- Calibration by comparison with a calibrated standard **hydrophone**, between 50 kHz and 40 MHz.

Table 1 – List of typical uncertainty values (for 95 % coverage) obtained by the calibration methods specified in this document and for the frequency range listed

Clause	Method	Frequency range	Uncertainty
9	Two-transducer reciprocity calibration (9.3.4)	1 MHz to 2 MHz	6 %
		up to 10 MHz	10 %
		up to 15 MHz	16 %
	Three-transducer reciprocity calibration (9.3.2)	50 kHz to 100 kHz	5 %
		up to 500 kHz	6 %
		up to 1 MHz	10 %
10	Free field calibration by planar scanning (Annex D)	500 kHz to 10 MHz	6 %
		up to 15 MHz	18 %
11	Free field calibration by optical interferometry (Annex F)	200 kHz ^a to 1 MHz	7 %
		up to 10 MHz	7 %
		up to 20 MHz	8 %
		up to 30 MHz	10 %
		up to 40 MHz	11 %
		up to 60 MHz	11 %
		up to 80 MHz	17 %
		up to 100 MHz	36 %
12	Calibration by comparison using a standard hydrophone (12.5.2) (Annex G, Annex H)	50 kHz to 200 kHz	9 %
		up to 1 MHz	8 %
		up to 10 MHz	7 %
		up to 20 MHz	11 %
		up to 30 MHz	12 %
		up to 40 MHz	12 %

^a The lower frequency range of 200 kHz should not be taken as the lower limit to which calibrations can be carried out using optical interferometry. This lower limit is typically controlled by reflections from the water tank walls, the device being calibrated, or other technical restrictions.

5.3 Reporting of results

The modulus of the end-of-cable sensitivity of the **hydrophone assembly** shall be stated in V/Pa or in decimal submultiples, or as a logarithmic level in dB with reference to a stated sensitivity value. It shall be stated whether the sensitivity value given is the **end-of-cable open-circuit sensitivity** or the **end-of-cable loaded sensitivity**. In the latter case, the relevant electrical loading conditions shall be stated, i.e. the **electric load impedance**, in order to obtain the stated sensitivity.

The phase of the end-of-cable sensitivity can be given as a function of frequency as a list of values and, in addition, graphically.

NOTE 1 "End-of-cable" refers to the end of the output cable of the **hydrophone assembly**, with or without a **hydrophone pre-amplifier**.

The **uncertainty** of the stated sensitivity shall be given. If the sensitivity is given for a frequency interval, then the **uncertainty** shall be given for exactly the same interval. If the sensitivity is given for a number of frequency points, then the **uncertainty** should be given for frequency intervals that are likely to be useful to the user.

NOTE 2 Guidance on the assessment of **uncertainty** can be found in Annex A.

The frequency interval over which the sensitivity is given and over which the **uncertainty** applies shall be stated. For the purposes of this document, sensitivity and **uncertainty** values can be given separately for several frequency intervals. The frequency response can be given in terms of absolute sensitivity values or in a relative representation, relative with reference to the absolute **hydrophone** sensitivity at a certain frequency. In the case of the relative representation, the reference sensitivity and the frequency to which it applies shall be stated.

The methods by which the sensitivity and its **uncertainty** have been obtained shall be described.

Any calibration is only valid for the environmental conditions existing during the calibration. The environmental conditions pertaining to that calibration shall therefore be stated. These shall include all those conditions that can influence the sensitivity of the test device. Conditions to be reported shall include:

- date of the calibration;
- water temperature and its **uncertainty**;
- whether or not a **hydrophone pre-amplifier** is included in the **hydrophone assembly**, including unique identification information;
- water properties, length of soaking time and any wetting procedure adopted, such as the addition of a wetting agent;

NOTE 3 The sensitivity of single-layer, electrically unshielded membrane **hydrophones**, for example is affected by the electrical conductivity of the water used.

NOTE 4 The response of some **hydrophones** can change during immersion in water, and it is important that the calibrations have been completed only following sufficient soaking such that response has stabilized.

- the orientation of the **hydrophone** about any axis or alignment mark presented on its body or casing;
- in situations where the mounting arrangement affects the sensitivity of a **hydrophone**, the details of the mount shall be specified;

NOTE 5 It is important to take care in designing the **hydrophone** mount at low frequencies (below 200 kHz) where the acoustic **wavelengths** are sufficiently large that the use of long-bursts can lead to the direct acoustic signal being contaminated by reflections from the mount. The importance of the effect can be investigated through varying the burst length and observing the influence of reflections on the **hydrophone** signal. Acoustic absorbers can be useful in suppressing these reflections. **Hydrophone** sensitivity can also be affected by the way the **hydrophone** is clamped, and again this can be evaluated by systematically investigating the various configurations. Also, for some probe and needle-type **hydrophones**, depending on the construction geometry, internal reverberations can be present but arrive only after a significant delay. Therefore, it is important to ensure that the insonation conditions pertaining to the **hydrophone** calibration are appropriate for its subsequent application [11].

- a specification of the characteristics of any additional cables attached to the **hydrophone**, during the calibration;
- the nominal direction of ultrasonic incidence in relation to the **hydrophone**;

NOTE 6 This is important, as it has been found in the literature [12] that even with membrane **hydrophones**, the response can change upon reversal of the ultrasonic propagation direction in relation to the **hydrophone**.

- the maximum acoustic pressure experienced by the **hydrophone** during the calibration;

NOTE 7 Annex B describes the linearity of **hydrophones** manufactured from polyvinylidene fluoride (PVDF) for use in characterizing high amplitude acoustic fields.

- any assumptions made about the device under test (e.g. the position of the **hydrophone reference centre**).

If use is made of a calibrated **hydrophone** in an environment significantly different from that which existed during calibration, the user can be obliged to increase his or her assessment of measurement uncertainties to account for the change in environment.

5.4 Recommended calibration periods

The recommended calibration period for the **hydrophone** will depend on its characteristics. This interval shall be specified by the manufacturer.

NOTE 1 A calibration period of one year will be appropriate in most cases (see IEC 62127-3).

For reference **hydrophones**, which are used purely for calibration purposes, it is recommended that a calibration is performed annually. Where **hydrophones** are used in the field, calibrations can be required at shorter time intervals.

NOTE 2 It can be useful to check the calibration of a working (or field) **hydrophone** through a "spot check" comparison with a second calibrated (reference) **hydrophone** or a check source, using one of the waveform concepts described in Annex G. In extreme cases, where there are concerns regarding the stability of a working **hydrophone**, this can be undertaken before and after measurements (see **hydrophone** use in IEC 62127-1).

6 Generic requirements of a hydrophone calibration system

6.1 Mechanical positioning

6.1.1 General

Precise positioning and orientation of the transducer, **hydrophone** and reflector (for the reciprocity method specified in Clause 9) is needed and these components should be mounted in stable, rigid supports which allow the appropriate adjustments to be made. It is recommended that the **hydrophone** and transducer are equipped with a means of setting their lateral positions and orientation such that the change in the **hydrophone** output signal is less than 0,1 dB if the mounts controlling either the spatial position or the relative orientation of the **hydrophone** are moved by one incremental step.

6.1.2 Accuracy of the axial hydrophone position

The axial distance of the **hydrophone reference centre** from the transducer shall be known and reproducible to within 0,2 mm.

NOTE 1 In order to derive the calibration **uncertainty**, repeat measurements can be made that can involve the removal and replacement of the **hydrophone** at the same position in the transducer field.

NOTE 2 The distance of the **hydrophone** from the transducer can be estimated from a knowledge of the time elapsed between the electrical excitation applied to the transducer and the arrival time of the acoustic wave at the **hydrophone**, through a knowledge of the speed of sound in water at that particular temperature.

This requirement will possibly need modification in the case of focusing source transducers, dependent on their actual axial field distribution.

NOTE 3 For focusing source transducers operating in the frequency range of this document, positioning is critical. The following is an assessment of the axial distance change from the focal length, i.e. $\Delta z = F - z$, leading to a pressure reduction of 1 dB. Starting from the theoretical formula $\sin[\xi(1/z - 1/F)] / [\xi(1/z - 1/F)] = 0,89$, where

$$\xi = \pi a_t^2 f / (2c), \text{ a two-term sine expansion yields } \Delta z = 0,808 F^2 / \xi.$$

NOTE 4 In the following example, if a plane ultrasonic wave in the linear amplitude range is propagated at a water temperature of 22 °C, the ultrasonic amplitudes at two axial positions that are 2 mm apart differ by 0,09 dB for a frequency of 15 MHz and by 0,7 dB for a frequency of 40 MHz, as a consequence of the frequency-dependent attenuation (see Annex E).

6.1.3 Accuracy of the lateral hydrophone position

The variation of the **hydrophone** output voltage should be checked when the lateral **hydrophone** position is changed to ensure that the signal is maximized. The condition for the lateral **hydrophone** position is that the output signal shall not be reduced by more than 0,5 dB from the maximum value.

NOTE In the **far field** of a theoretical, plane circular piston source and in the focal plane of a theoretical, focusing transducer under linear propagation conditions, the lateral distance from the field axis is $r = 0,107 \cdot c \cdot z / (f \cdot a_t)$ for a 0,5 dB amplitude reduction and $r = 0,151 \cdot c \cdot z / (f \cdot a_t)$ for a 1 dB amplitude reduction.

6.2 Temperature measurements and temperature stability

The electroacoustic properties of **hydrophones** vary with ambient temperature. For this reason, it is recommended that wherever possible, the **hydrophone** is calibrated under the same conditions of temperature as those under which it will be used. If this is not possible, then corrections to **hydrophone** sensitivity and frequency response values can be applied based on earlier calibrations or validated analytical models. The corrected **hydrophone** sensitivity and response values should have lower **uncertainty** than the uncorrected values.

Temperature drifts are to be avoided for two reasons:

- a) the amplitude of the ultrasonic wave arriving at the **hydrophone** depends on the temperature, as a consequence of the temperature-dependent ultrasonic attenuation in water (see Annex E);
- b) the time-of-flight of the ultrasonic signal depends on the temperature, as a consequence of the temperature-dependent speed of sound in water (see Annex E, Table E.1). This is of relevance to the adjustment of the time gate for bursts or pulses and also to time delay spectrometry.

With respect to a), the following example can be given. If a plane ultrasonic wave in the linear amplitude range is propagated over 15 cm at a temperature of approximately 22 °C, the resulting ultrasonic amplitude differs for two temperatures that are 1 °C apart by 0,2 dB at a frequency of 15 MHz and by 1,5 dB at a frequency of 40 MHz. (The attenuation coefficient in water is proportional to the square of the frequency. Values as a function of temperature are given in Annex E).

With respect to b), the following recommendation can be made: in a measurement of Type II specified in Clause 12 (comparison of sensitivity of two or more **hydrophones**), the axial **hydrophone** distance should be adjusted to a constant propagation time.

6.3 Hydrophone size

The active element of a **hydrophone** generates a voltage across its electrodes proportional to the average acoustic pressure over its surface. If full spatial resolution is to be achieved, therefore, the **effective hydrophone size** shall be small compared with the **wavelength** of the highest frequency component within the acoustic field used for calibration. Furthermore, the actual acoustic pressure on the **hydrophone's** sensitive surface is influenced by diffraction of the **hydrophone** itself [9],[13],[14].

NOTE 1 If the **hydrophone** is carefully designed to have a known or well-defined active surface, it is possible to remove the effects of spatial averaging and diffraction from the data, at a given frequency, by deconvolution, based on the known dimensions of the active element.

NOTE 2 Guidance in assessing the influence of spatial averaging on calibrations can be found in IEC 62127-1 and Annex J.

6.4 Measurement vessel and water properties

The test tank shall be sufficiently large to allow the establishment of **free field** conditions at the lowest frequency of interest. It should also be large enough to allow the transducer–**hydrophone** separation to be varied to a degree consistent with the requirements of the applied calibration technique.

The walls of the tank and water surface should be at a sufficient distance from the transducer and **hydrophone** to ensure that any signal resulting from reflections at these surfaces will not interfere with the first signal arrival generated by the transducer. Furthermore, where possible, such surfaces should be lined with acoustically absorbent materials.

It is important that the acoustic signal is not contaminated by reflections. The following check is recommended at the beginning of each measurement. In all cases where bursts or pulses are applied, the **hydrophone** output signal should be observed when the transducer–**hydrophone** distance is varied over several millimetres, in order to ensure the absence of multiple transducer–**hydrophone** echoes from the signal received. If such echoes interfere with the signal received, a remedy can be to change the pulse repetition frequency.

The water properties shall be consistent with the specification provided by the **hydrophone** manufacturer.

NOTE The sensitivity of some **hydrophones** can be dependent on the electrical conductivity of the water medium. In such cases, it is important to take care to ensure that the conditions for the measurement are sufficiently similar to those of the calibration.

6.5 Measurement of output voltage

The signal from the **hydrophone** or **hydrophone pre-amplifier** and any transducer shall be measured with the aid of an oscilloscope, digital signal analyser, spectrum analyser or other appropriate instrument with sufficient bandwidth and sensitivity. Additional amplification of the signal from the **hydrophone** or **hydrophone pre-amplifier** will possibly also be necessary in order to achieve acceptable signal-to-noise.

The instrument to which the **hydrophone** or **integral amplifier** is connected (e.g. oscilloscope, digital signal analyser, spectrum analyser, amplifier) shall meet the following requirements:

- its complex input impedance over the relevant frequency range of interest shall be known so that the **end-of-cable loaded sensitivity** can be determined (see Annex C);
- its linearity with the input signal over a dynamic range of 50 dB shall be better than $\pm 0,3$ dB;
- in the case of a digital signal analyser: for recording temporal waveforms, the sampling rate shall be at least $5f$ samples per second, where f is in hertz. Antialiasing precautions should be considered if appropriate. Also, the gain shall be adjusted to allow at least seven significant bits in the digitized waveform.

NOTE For an upper frequency limit of 100 MHz, for example, it is important that the sampling rate is at least 500 million samples per second.

7 Electrical considerations

7.1 Signal type

The signal used for the calibration can be either broadband pulse, swept sinusoidal [15] or pulsed sine wave (gated tone-burst). A sufficient number of frequencies shall be chosen to ensure that the **hydrophone** performance is well-characterized over the desired frequency range.

NOTE The various possible waveform concepts that can be used to obtain **hydrophone** calibration information over the frequency range of interest are summarized in Annex G.

7.2 Earthing

In order to avoid earth loops, the electrical terminals of the transducers should be kept free from contact with the water. Exposed metal parts of one **hydrophone** shall be the only earth connection for the cable screen of the **hydrophone** and for the **hydrophone** amplifier. All other earth contacts shall be excluded.

NOTE This condition can be relaxed when a tone burst is used such that the acoustic signal arrives at the **hydrophone** after the electrical excitation is completed.

7.3 Measurement of hydrophone output voltage

7.3.1 General

The open-circuit voltage of the **hydrophone** shall be determined at the end of the **hydrophone** cable.

For a continuous wave signal, the measurement can be done using a high impedance voltmeter. However, for tone-burst signals, it is best accomplished by digitizing the **hydrophone** voltage waveform, for example using a digitizing oscilloscope or a computer-based analogue-to-digital converter. Where an amplifier, attenuator or filter are used in combination with the voltmeter or digitizer to form a measuring channel, these elements will generally also require calibration.

NOTE Continuous wave signals relevant to **hydrophone** calibration techniques are described in Annex H. Amplitude-modulated waveform concepts are described in Annex G.

7.3.2 Electrical loading by measuring instrument

During the measurements, the **hydrophone** shall be connected to a high input impedance measuring instrument (amplifier, voltmeter, oscilloscope or digitizer). Where the impedance of the **hydrophone** is high (for example for a small piezoelectric **hydrophone** of low capacitance), consideration shall be given to the electrical loading of the **hydrophone** by the measuring instrument. In such cases, electrical loading corrections shall be applied to the measured voltage to obtain the open-circuit voltage. The corrections can be calculated using the procedure given in Annex C. If the same electrical load is used throughout the calibration for a particular **hydrophone**, then corrections can be applied to the sensitivity rather than to the individual measured voltages.

NOTE 1 If, in a practical application, the **hydrophone** is used with subsequent electronic components such as amplifier, oscilloscope, etc., the frequency response of the whole system is, of course, influenced also by the frequency response of these additional components.

NOTE 2 It is important to pay attention to the appropriateness of the output impedance of the **hydrophone** or amplifier in relation to the input impedance of the connected measuring instrument.

7.3.3 Electrical loading by extension cables

If an extension cable is attached to the **hydrophone**, this cable will electrically load the **hydrophone** and corrections shall be applied to obtain the open-circuit end-of-cable **hydrophone** voltage. Where the cable and **hydrophone** appear electrically to be purely capacitances (this is generally true for a cable and is true for a **hydrophone** in the frequency range well below resonance), a correction can be derived from the capacitances of the **hydrophone** and cable. Where the impedance of the **hydrophone** is not purely capacitive (for example at frequencies close to resonance), the complex impedance shall be used to calculate the loading correction. Guidance on both the above cases is given in Annex C. If the same extension cable is used throughout the calibration for a particular **hydrophone**, the corrections can be applied to the sensitivity rather than to the individual measured voltages.

NOTE To reduce the impact of electrical loading, some **hydrophones** are provided with a **hydrophone pre-amplifier** that is typically mounted as close to the **hydrophone** as possible (see 7.3.6). This is particularly important, at high frequencies, as a means of reducing the effect of cable resonances.

7.3.4 Noise

The level of electrical noise can degrade the accuracy with which electrical measurements can be made. The signal-to-noise ratio shall be sufficient such that measurements can be made without significant loss of accuracy. The signal amplitude should be at least 20 dB greater than the noise level.

NOTE 1 The level of broadband interfering noise can be reduced by the use of a band-pass filter with a bandwidth sufficiently wide to allow the signal to pass through without distortion.

NOTE 2 In the presence of electrical noise, the signal-to-noise ratio can be improved by the averaging of repeated signals. For random noise, averaging N_{av} signals will improve the signal-to-noise ratio by a factor of the square root of N_{av} .

7.3.5 Cross-talk (radio-frequency rf pick-up) and acoustic interference

In the presence of interference and cross-talk, signal-averaging and narrow-band filtering will not in general lead to an improvement. Efforts should be made to determine the cause of the problem and steps taken to minimize the effects. The acoustic interference level shall be at least 30 dB lower than the signal level.

Where cross-talk is present with tone-burst signals, care should be taken if the length of the burst is greater than the acoustic propagation delay.

NOTE 1 In these situations, cross-talk will contaminate the direct acoustic signal. The effect can be evaluated through varying the tone-burst length and observing any consequent changes in the **hydrophone** waveform using an oscilloscope.

In the case of a continuous wave signal, the cross-talk level shall be at least 40 dB lower than the signal level.

NOTE 2 The level of rf pick-up or cross-talk can be estimated by placing an extremely acoustically attenuating (but thin) layer of material (such as expanded polystyrene) directly between the transducer and the **hydrophone**. This will completely extinguish the acoustic signal, leaving the signal due to the pick-up.

7.3.6 Integral hydrophone pre-amplifiers

Where a **hydrophone** has an integral **hydrophone pre-amplifier**, the sensitivity can be expressed as end-of-cable sensitivity (including the performance of the **hydrophone pre-amplifier**). Where a **hydrophone** has an integral **hydrophone pre-amplifier**, corrections for electrical loading by extension cables or measuring instruments are unnecessary.

8 Preparation of hydrophones

8.1 General

Prior to the actual calibration procedure, careful preparation of the **hydrophones** is necessary, as outlined in 8.2 to 8.4.

8.2 Wetting

The user shall ensure that the **hydrophone** is wetted properly and that all air bubbles are removed from the **hydrophone** and faces taking active part in the calibration. After measurements are completed, the active faces shall again be inspected, and the measurements shall be discarded if any air bubbles are found.

8.3 Hydrophone support

The ideal supporting mount for a **hydrophone** shall cause minimal influence on the measured sensitivity. However, some **hydrophones** are more susceptible than others to the influence of the method of mounting.

In situations where the mount does have an effect, the **hydrophone** should be calibrated in the same mount that will be used for measurements made with the **hydrophone** in the field. If the mount influences the measured sensitivity, then the calibration is only valid for the type of mount used. Where the **hydrophone** is sensitive to the type of support or mount, a description of the mounting arrangement should be stated with the results.

8.4 Influence of cable

If the cable to the **hydrophone** is lengthened for the purposes of the calibration, the electrical impedance of the extension cable shall be measured separately in order to calculate the influence of electrical loading. A description of how to account for the influence of electrical loading is given in Annex C.

9 Free field reciprocity calibration

9.1 General

Clause 9 specifies the primary reference measurement procedure (see ISO/IEC Guide 99:2007, 2.8 [16]) for the calibration of **hydrophones** under **free field** conditions using the principle of reciprocity.

NOTE The **free field** condition can be achieved in a confined water space by following any of a variety of measurement procedures, such as with the use of tone-burst (time-gated sine wave – see 10.4.4), time-delay spectrometry [17],[18], frequency-modulated chirp [19],[20] or other techniques [21].

9.2 Object

The object of Clause 9 is to specify various methods of absolute calibration of laboratory standard **hydrophones** with the smallest obtainable **uncertainty**. These methods cover the frequency range between 50 kHz and 15 MHz.

9.3 General principles

9.3.1 General

For a linear, passive, reversible electroacoustic transducer, a well-defined relationship exists between its **free field** sensitivity as a detector and its transmitting response to current. This relationship is expressed for a particular arrangement of the components within a system of transducers in the definition of the reciprocity coefficient.

All calibrations based on the principle of reciprocity require the use of a reciprocal transducer as both a transmitter and a receiver. Provided changes occurring within the acoustic field between transmission and reception are known, then the transmitting response and the receiving sensitivity of the transducer can be determined directly by measuring the drive current and received signal voltage. One obvious advantage of this method is that the required acoustic parameters are determined by the measurement of electrical quantities only. In practice, calibrations based on the principle of reciprocity can take several forms, briefly specified below.

9.3.2 Three-transducer reciprocity calibration method

A procedure commonly used for applications in marine acoustics involves the use of three transducers (see IEC 60565-1 [2]).

This method can be difficult to implement at higher frequencies, however, because of the need for greater accuracy in the adjustment of transducer position and orientation, and because of the complex nature of the **directional response** characteristics of transducers used at frequencies of a few MHz. Consequently, this method is recommended for calibrations in the frequency range 50 kHz to 1 MHz.

9.3.3 Self-reciprocity calibration method

Calibration by self-reciprocity, which involves the use of only the test transducer and a reflector, requires a minimum of geometrical adjustment to be carried out. This technique is not, however, generally applicable to high-frequency **hydrophones** which, because of their size, have insufficient acoustic output for an adequate signal-to-noise ratio in the received signal (the minimum diameter for a practical transducer is about 2 mm).

9.3.4 Two-transducer reciprocity calibration method

For the frequency range 1 MHz to 15 MHz, standard **hydrophones** can be calibrated by the two-transducer method in which the **hydrophone** is placed within the known field generated by an auxiliary transducer; a field which has previously been quantified by self-reciprocity procedures. The technique is capable of providing calibration data of an accuracy consistent with performance specifications laid down for the standard **hydrophone**, but does not involve such critical adjustment of component positions and orientations as the three-transducer method.

9.4 Two-transducer reciprocity calibration method

9.4.1 General

Within this document, information on this calibration technique is also presented in Annex K for information purposes.

9.4.2 Auxiliary transducers

Circularly plane piston auxiliary transducers should be used to generate the ultrasonic field in the frequency range of interest, which is limited from 1 MHz to a maximum of 15 MHz. The effective radiation area (A_{ER}) shall be determined, in accordance with IEC 61689, for each transducer and at all frequencies the transducer is intended to be used. If a frequency-modulated chirp is to be used as excitation signal, the A_{ER} shall be determined at least in the minimum, maximum and one intermediate frequency in the range of interest.

The position of the last minimum of acoustic pressure amplitude along the axis of symmetry, d_m , shall be determined with an **uncertainty** not larger than 1 mm. It shall be done as an on-axis line scan, in accordance with IEC 61689, at the same frequencies the A_{ER} was determined.

The **near field** distance produced by the auxiliary transducer is defined as $N_1 = a_t^2 / \lambda$, where λ is the ultrasonic **wavelength** in water at the frequency of operation and $a_t = \sqrt{2\lambda d_m + \lambda^2}$ is the **effective radius of the non-focusing ultrasonic transducer**.

The effective radiation area (A_{ER}) is used in the Formula of Annex K to properly assess the diffraction correction and the reciprocity coefficient for plane waves, whilst the last minimum of pressure amplitude along the axis of symmetry (d_m) is used to indirectly define the **near field** distance (N_1), being $N_1 = (2\lambda d_m + \lambda^2) / \lambda$. Although both quantities A_{ER} and d_m are directly linked for ideal transducers, both shall be determined experimentally in accordance with IEC 61689.

Focusing auxiliary transducers can also be used, but it is important to consider additional corrections. Details on the implementation of the reciprocity-based calibration method using focusing transducers can be found in Clause K.7.

9.4.3 Reflector

The reflector should comprise a flat surface whose smallest linear dimension shall be at least four times the **effective radius of the non-focusing ultrasonic transducer** a_t . The reflector shall also be flat to $\pm 10\ \mu\text{m}$, with a surface finish good to $\pm 5\ \mu\text{m}$ (surface roughness: $R_v < 5\ \mu\text{m}$; $R_p < 5\ \mu\text{m}$; $R_a < 1\ \mu\text{m}$). The thickness of the reflector shall be such that the first reflection from the rear surface will not interfere with that directly from the front surface for any of the excitation signals to be used. Special attention shall be given for long burst or low-rate frequency-modulated chirps, mainly at the lowest frequencies of interest.

The amplitude reflection coefficient for the reflector–water interface R_{RT} shall be experimentally determined, for instance by the relation $R_{RT} = (Z_{RT} - \rho c) / (Z_{RT} + \rho c)$, where ρc is the characteristic acoustic impedance of the water and Z_{RT} is the characteristic acoustic impedance of the reflector.

NOTE R_v is the maximum valley depth, R_p is the maximum peak height and R_a is the arithmetic average describing the reflector profile roughness amplitude parameters.

9.4.4 Measurement field

As both the auxiliary transducer and the **hydrophone** have finite apertures, a diffraction pattern is present in the ultrasonic field. To minimize uncertainties due to the analytical or numerical corrections to be applied to the measurement quantities, the nearest measurement shall be performed at least at $0,9 \times N_1$, and the furthest distance shall not be larger than $2,2 \times N_1$. Water-air surface and tank walls shall be far enough from the ultrasonic path such that any reflected waveform will not interfere with the direct waveform at the measurement spot.

If any structure is too close to the direct ultrasonic waveform path, it shall be covered with absorbing lining to minimize the interference with the measurement signal, and concern about that interference shall be included in the **uncertainty** budget.

9.4.5 Reciprocity approach

Reciprocity can be established as a primary **hydrophone** calibration method provided some practical and theoretical details are adopted. Annex K depicts the fundamentals of the reciprocity approach.

9.4.6 Measurement procedure

Several distinct set-ups (see Annex K,[22],[23],[24]) can be used regarding the positioning of the three main elements of the two-transducer reciprocity calibration method: auxiliary transducer, reflector and **hydrophone**.

Regardless of the configuration adopted, the self-calibration of the auxiliary transducer is the first step, and it is done to quantify the acoustic pressure generated by the transducer in a defined spot in the ultrasonic field.

10 Free field calibration by planar scanning

10.1 General

This Clause 10 specifies the calibration of **hydrophones** using the planar scanning method.

10.2 Object

The object of Clause 10 is to specify the planar scanning method of calibrating a **hydrophone**. This utilizes a reference transducer whose output power is known. This transducer or source can be a standard device of known and reproducible output power, characterized traceable to national standards, or it can be calibrated prior to the planar scanning calibration, using, for example a radiation force balance in accordance with IEC 61161. The method covers the frequency range between 500 kHz and 15 MHz, although it can be applied at higher frequencies, with degraded uncertainties.

10.3 General principle

If M_L is the modulus of the **end-of-cable loaded sensitivity** at a single frequency f of a **hydrophone** whose **reference centre** is at coordinate position (x, y, z) , the **instantaneous acoustic pressure** $p(x, y, z, t)$ is related to the measured end-of-cable voltage $U_L(x, y, z, t)$ by

$$p(x, y, z, t) = U_L(x, y, z, t) / M_L \quad (8)$$

where

(x, y, z) are the coordinates of any point in the field; and
 t is any instant in time.

Here, $p(x, y, z, t)$ relates to the acoustic pressure in a single frequency tone burst plane wave at the **hydrophone reference centre** if the **hydrophone** were removed.

The **instantaneous intensity** vector, $\vec{I}(x, y, z, t)$, at a reference point in an ultrasonic field from a transducer whose centre is at the origin of the coordinate system is given by

$$\vec{I}(x, y, z, t) = p(x, y, z, t) \cdot \vec{v}(x, y, z, t) \quad (9)$$

where

$\vec{v}(x, y, z, t)$ is the instantaneous particle velocity vector at the reference point.

The components of $\vec{I}$ and $\vec{v}$ in the propagation direction will be considered, thereby restricting them to the scalar quantities I and v .

For progressive wave propagation under certain conditions ($a_t / l \leq 0,5$), where l is the axial distance from the transducer, the **instantaneous intensity** can be calculated [25] by

$$I(x, y, z, t) = [p(x, y, z, t)]^2 / (\rho c) \quad (10)$$

where

ρ is the (mass) density of the measurement liquid (water); and
 c is the speed of sound in water.

(See Annex E for the temperature dependence of ρ and c for water, the recommended transmission medium used for power measurements.)

The total ultrasonic power $P(l)$ transmitted through a plane at $z = l$ perpendicular to the z -axis is given by

$$P(l) = \iint \overline{I(x, y, z, t)} \cos \theta \, dy \, dx \quad (11)$$

where

$dy \, dx$ is an elemental area in the plane $z = l$;

θ is the angle between the z -axis and the propagation direction, the integral denotes integration over the entire plane.

NOTE 1 At the distances l considered in this document (greater than $a_t^{2/\lambda}$ where a_t is the **effective radius of a non-focusing ultrasonic transducer**), θ can be considered to be the angle between the z -axis and the line joining the centre of the transducer to the centre of the **hydrophone**.

The bar in Formula (11) indicates the time-averaged value defined for any quantity g by

$$\overline{g} = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\left(\frac{1}{2T} \right) \int_{-T}^T g(t) \, dt \right] \quad (12)$$

Taking the time average of Formula (10)

$$\overline{I(x, y, z, t)} = \overline{p(x, y, z, t)^2} / (\rho c) \quad (13)$$

and from Formula (8)

$$\overline{I(x, y, z, t)} = \overline{U_L(x, y, z, t)^2} / (M_L^2 \rho c) \quad (14)$$

where

$U_L(x, y, z, t)$ is the end-of-cable voltage for a **hydrophone** with the **hydrophone** at reference point (x, y, z) and at time t .

Here, it is assumed that the time-averaged value of the square of the end-of-cable voltage is derived. From Formula (10), on the plane $z = l$ and neglecting the $\cos(\theta)$ term (see D.3.9), the modulus of the **end-of-cable loaded sensitivity**, M_L , is given by

$$M_L = \left\{ \frac{1}{P(l) \rho c} \iint [U_L(x, y, z, t)^2] \, dy \, dx \right\}^{1/2} \quad (15)$$

The modulus of the **end-of-cable loaded sensitivity** of a **hydrophone** can, therefore, be determined by scanning the **hydrophone** over a plane in the ultrasonic beam, and dividing the integral of the average value of the square of the **hydrophone** signal by the total power in the beam.

NOTE 2 The modulus of the **end-of-cable open-circuit sensitivity**, M_c , can be determined through a knowledge of the electrical impedances of the **hydrophone** and amplifier determined in the way described in Annex C.

10.4 Procedural requirements

10.4.1 Hydrophone scanning

There are several ways of scanning the **hydrophone** over the plane $z = l$ in the ultrasonic beam. The most comprehensive is to obtain a rectangular array of sample points by moving the **hydrophone** in a two-dimensional raster scan. An alternative scanning procedure is possible if the beam profile from the transducer can be assumed to be approximately cylindrically symmetrical. In this case, a number of **diametrical beam scans** can be performed. These scans should pass through the ultrasonic **beam centre** and be spaced at equal angular increments. For example, if two scans are performed, they should be at 90° to each other. Guidance on the choice of scan types can be found in Annex D.

10.4.2 Power measurement

Use a transducer with a plane disc active element of known total output power at a particular frequency f . The transducer can be a standard transducer [26], in which case the output power shall be known in terms of the particular drive voltage.

Alternatively, determine the output power using the radiation force method [27] as specified in IEC 61161.

Whichever method is used, determine the total ultrasonic power emitted by a transducer, P_o , at the frequency f under continuous sinusoidal electrical excitation either at a particular drive voltage U_T or over a range of different applied voltages. These measurements provide a value for the output power divided by the square of the voltage (see IEC 61161).

10.4.3 Transducer mounting

Mount the transducer in a beam scanning tank and align it so that the transducer **beam axis** is parallel to the z -axis of the scanning system. Mount the **hydrophone** to be calibrated in the scanning tank and align it following the procedure specified in IEC 62127-1. At the end of this alignment procedure, the z -axis of the scanning system shall be parallel to both the **beam axis** of the transducer and to the direction of maximum sensitivity of the **hydrophone**.

NOTE Typical mounting arrangements commonly utilize the transducer and **hydrophone** mounted in either horizontal or vertical configurations. Whatever arrangement is used, relative alignment of the transducer and **hydrophone** and one of the axes of the scanning system (referred to above as the z -axis) are maintained.

10.4.4 Measurement conditions

Drive the transducer using a gated sinusoidal excitation (tone-burst) containing a sufficient number of oscillations to ensure steady-state conditions of frequency f either at the particular drive voltage U_T or at a voltage within the range used in the radiation force technique. Position the **hydrophone** at $z = l$ in the **far field** of the transducer and locate the point of peak acoustic pressure. Choose the distance l carefully, taking into account spatial averaging, directivity and attenuation corrections (see Annex D) and the need for maximum signal-to-noise ratio.

A value of l in the range from a_t^2/λ to $3a_t^2/\lambda$ is generally satisfactory, where a_t is the **effective radius of a non-focusing ultrasonic transducer** and λ is the ultrasonic **wavelength**. The geometrical radius of the transducer can be used instead if the **effective radius of a non-focusing ultrasonic transducer** (a_t) is not known.

Use continuous wave excitation of the ultrasonic transducer if gating of the excitation is impractical. In this case, take extreme care to avoid reflections from the tank walls and the **hydrophone** and its support, and the formation of standing waves.

10.4.5 Measurements

Measure the amplitude of the output voltage of the **hydrophone** as the **hydrophone** is scanned over the plane $z = l$ perpendicular to the z -axis, either in a raster scan or in a number of **diametrical beam scans**. Measure the end-of-cable voltage $U_L(x, y, z, t)$ at the **hydrophone** as a function of the position of the **hydrophone** in the ultrasonic beam. Determine the extent of the scanned region from considerations of the noise level. Sum the square of the voltage over the area of the ultrasonic beam and derive a value for the modulus of the **end-of-cable loaded sensitivity** of the **hydrophone** at the frequency f (see Annex D).

10.5 Corrections and sources of uncertainty

Make a final statement of the total **uncertainty** in the determination of the **end-of-cable loaded sensitivity** of the **hydrophone**. Detailed guidance on assessing these sources of **uncertainty** can be found in Annex D.

11 Free field calibration by optical interferometry

11.1 General

Currently, the **free field** calibration of **hydrophones** using optical techniques is restricted to specialized laboratories. Within this document, information on this calibration technique is presented in Annex F and is provided for information purposes.

11.2 Principle

Typically, such techniques involve applying optics to determine the acoustic displacement produced by a transducer at a position in the acoustic field. These techniques are carried out using a thin membrane or foil positioned within the field, which moves in sympathy with the acoustic displacement. A surface of the foil, which is typically a few microns thick, is metallized to be optically reflecting. Using optical interferometric techniques, the displacement can be determined. In the **far field** of the transducer, the displacement is simply related to the acoustic pressure, allowing the latter to be determined at a point in the field. A **hydrophone** is calibrated by positioning it at the same location and determining the output voltage. Three realizations of the technique implemented by national standards laboratories can be found in Annex F.

12 Calibration by comparison using a standard hydrophone

12.1 General

In Clause 12 two types of measurement are specified:

- Type I the determination of the **directional response**;
- Type II the comparison of sensitivity of two or more **hydrophones**.

12.2 Object

Both Type I and Type II measurements are referred to as "relative" measurements, which means that two or more measurements of the **hydrophone** output voltage under almost identical conditions are performed, with only one relevant parameter being varied, and that ratios of results (or logarithms of ratios of results) are considered.

NOTE As far as Type II is concerned, it is assumed in the following that the sensitivities of two **hydrophones** are being compared. This can easily be extended to three or more **hydrophones**.

12.3 Principle

In Type I, the parameter changed is the **hydrophone** orientation angle. The **hydrophone** output voltage at a certain angle is considered in relation to the **hydrophone** output voltage in a reference orientation. In practice, of course, this will be done for a series of angles of rotation. This type of measurement is to obtain the **directional response** and the **effective size** in accordance with IEC 62127-3.

In Type II, the **hydrophone** itself is replaced by another one. It is understood here that one **hydrophone** is a reference **hydrophone** and the other is the **hydrophone** under test. This type of measurement is to obtain the sensitivity of the **hydrophone** under test, if the sensitivity of the reference **hydrophone** is known (from any calibration), and the frequency response of the **hydrophone** under test, if the frequency response of the reference **hydrophone** is known (from any calibration).

These relative measurements have the following features in common: they are performed in a water tank and in the ultrasonic field emitted by a transducer to be characterized below. It is vital that measurements carried out in relation to one another are performed as far as possible under identical conditions, meaning at the same position in the field, under the same excitation conditions (waveform and amplitude) and under the same environmental conditions (e.g. temperature), etc. The overall aim is to work under plane wave conditions.

For measurements of Type II, the **uncertainty** in the calibration is affected by the influence of spatial averaging. Methods of assessing this for various comparison configurations are specified in 12.6.

12.4 Procedural requirements

12.4.1 Source transducer

The ultrasonic source transducer for the measurements specified here shall be a circularly symmetric ultrasonic transducer for use in water. Various concepts exist related to the electrical excitation applied to the transducer, the transducer type and the nature of the acoustical waveform at the position of the **hydrophone** (linear, nonlinearly distorted). These are described in Annex G. Either plane non-focusing transducers for **hydrophone** position concepts A, B or C or a focusing transducer for **hydrophone** position concepts D or E can be used. Depending on the waveform concept chosen, it shall be able to produce the necessary amplitude (adequate signal-to-noise in the **hydrophone** signal) at the frequency values of interest. This requirement includes the amplifier driving the transducer. The transducer shall be temporally stable and it shall not lead to a warm-up of the water bath exceeding the acceptable temperature drift limits.

The following check is recommended at the beginning of each measurement: in all cases where bursts or pulses are applied (temporal waveform concepts a, b, c), the **hydrophone** output signal should be observed when the transducer-to-**hydrophone** distance is varied over several millimetres, in order to ensure the absence of multiple transducer and **hydrophone** echoes from the signal received. If such echoes interfere with the signal received, a remedy can be to change the pulse repetition frequency.

12.4.2 Source transducer drive signal

The amplitude of the drive signal for the source transducer shall be stable to within ± 1 %; its centre frequency shall be stable to within $\pm 0,1$ %.

12.4.3 Measurement system

The measurement system shall conform to the requirements specified in Clause 6, Clause 7 and Clause 8.

12.5 Procedure

12.5.1 Measurements (Type I): determination of the directional response of a hydrophone

Position the **hydrophone** in the water tank in the field of the source transducer, in accordance with the **hydrophone** position concept chosen (see Annex G) and with the **hydrophone reference centre** positioned on the transducer **beam axis**. Provide the measurement set-up with a mechanical device enabling the **hydrophone** to be rotated about an axis perpendicular to the **beam axis**, and achieve this independently for two rotation axes perpendicular to each other. The angular increment shall be chosen to ensure that the variation between adjacent points in the **directional response** is not more than 1 dB.

The **hydrophone** shall be rotated such that its **reference centre** is kept at the same place in the ultrasound field, in conformity to the positional accuracy requirements of Clause 6.

NOTE 1 For **hydrophones** of the unbacked membrane type, it is possible to check whether the **hydrophone** is actually rotating through its centre by rotating it through 180° and observing any resultant shift in the arrival time of the ultrasonic wave. For needle-type **hydrophones**, a special jig can be arranged, which ensures that the rotation is about the **reference centre**.

NOTE 2 Alignment of the rotational axis and the active element can be supported for any type of **hydrophone** by measuring short pulse test waveforms and observing any resultant shifts in arrival time during rotation. Symmetry considerations can then be used to derive necessary positioning corrections. The test can be repeated until time shifts are minimized finally indicating correct positioning [28].

The measurement can be conducted in two ways. Either measure the **hydrophone** output voltage as a function of the rotation angle at a constant frequency; or measure the **hydrophone** output voltage as a function of frequency at a constant angle of rotation, and this for several values of the angle of rotation. In the latter case, rearrange the data obtained to yield again the **hydrophone** output voltage as a function of the angle of rotation at a constant frequency. Divide the **hydrophone** output voltage measured by that obtained in the orientation of maximum output voltage.

Use the **directional response** measurements to determine the **effective hydrophone size** using the approach outlined in IEC 62127-3:2022, 5.6. Determine the **directional response** and the **effective hydrophone size** at a minimum of three frequencies in accordance with IEC 62127-3:2022, 5.5.2. The actual speed of sound is required for the determination of the **effective hydrophone size** from **directional response** measurements. Thus, it is necessary to record the water temperature at which the **directional response** has been measured.

NOTE 3 Values for the speed of sound c in water as a function of water temperature are listed in Annex E.

NOTE 4 The **effective hydrophone size** is important for the assessment of spatial averaging effects (see Annex J and IEC 62127-1). The **effective hydrophone size** can be frequency-dependent for some types of **hydrophone** and for any particular **hydrophone** can be dependent on the chosen axis. Further information on the **effective hydrophone size** can be found in IEC 62127-3.

12.5.2 Measurements (Type II): calibration by comparison using a standard hydrophone

This involves a series of measurements, where the **hydrophones** are placed alternately in the ultrasonic field. The minimum shall be a series of two measurements, one with each **hydrophone**. However, it is recommended that at least the first **hydrophone** be remeasured after the second one (this leading to a total of three measurements), to verify the stability of the applied acoustic field. A series of five or more single measurements would be even better.

In each single measurement, position the **hydrophone** in question in the water tank in the field of the source transducer and at the relevant place in accordance with the **hydrophone** position concept chosen (see Annex G). Maximize the output signal by lateral and rotational adjustment of the **hydrophone**.

The **reference centre** of the **hydrophone** in question shall be positioned in the ultrasonic field exactly at the relevant place chosen for this measurement series, in conformity to the positional accuracy requirements of Clause 6. Provide the measurement set-up with the mechanical means to make this positioning possible. As an additional, useful procedure, observe the time-of-flight (propagation time) of the ultrasonic burst or pulse as an indicator of the transducer-to-**hydrophone** distance.

Measure the **hydrophone** output voltage as a function of frequency and consider this in relation to the result obtained with the other **hydrophone**.

If the measurements on the two **hydrophones** are not carried out under the same electrical loading conditions, clearly state this and give the prescriptions for calculating the **hydrophone** sensitivity ratio for the same loading conditions.

12.6 Maximum hydrophone size

In order to avoid measurement errors due to spatial averaging in the measurements specified in 12.5, the **effective size** shall not exceed a limit $a_{\max}$ that depends on the details of the actual measurement as described in Annex J.

If it is not possible to follow this requirement, a larger **hydrophone** radius can be used in one particular situation, namely in the Type II measurement, if the two **hydrophones** to be compared have the same **effective size** value within $\pm 5\%$.

If these two requirements are not fulfilled, a theoretical correction can, if possible, be applied to the results obtained, but this shall be clearly stated and explained and a reference for the formulae used shall be given.

Annex A (informative)

Assessment of uncertainty in free field calibration of hydrophones

A.1 General

To be truly meaningful, the result of a calibration should be accompanied by its associated **uncertainty**. In evaluating and expressing the **uncertainty** in the calibration, ISO/IEC Guide 98-3:2008 [10] should be followed. In general, **uncertainty** components are grouped in accordance with how the values are estimated:

- Type A: evaluated by statistical means;
- Type B: evaluated by other means.

A.2 Overall (expanded) uncertainty

The overall **uncertainty** should be obtained from all **uncertainty** components in the manner described in ISO/IEC Guide 98-3:2008 [10].

When combining **uncertainty** components, care should be taken when component values are expressed in decibels. Before combination, the values should ideally be expressed in linear form (e.g. as a percentage or in the units of the quantity) and not in decibels. The final value of expanded **uncertainty** can be expressed either in the units of the quantity, as a percentage or converted to decibels as required.

Note that the use of decibels to express **uncertainties** can lead to asymmetric distributions (e.g. +1,5 dB is equivalent to +19 %, but –1,5 dB is equivalent to –16 %).

When each component of **uncertainty** is small, i.e. less than 1 dB, the overall **uncertainty** can be calculated using decibels.

A.3 Common sources of uncertainty

The following is a list of common sources of **uncertainty** in the calibration of **hydrophones**. This list should not be considered exhaustive but can be used as a guide when assessing uncertainties for a specific implementation of a calibration method. Depending on the calibration method chosen and its implementation, some (though possibly not all) of these sources will require assessment. For example, the errors from measuring instruments can be minimized by the use of the same measuring channel (amplifier, filter, voltmeter, etc.) for all signals and measuring only amplitude ratios. However, since this is possibly not the case in all implementations, components for these sources of error have been included in the list.

Sources of **uncertainty** specific to **free field** reciprocity calibrations:

- inaccuracy of any assumptions about the acoustic field, for example that the field is a spherical wave field;
- errors in the measurement of the separation distance;
- errors in the values for acoustic frequency;
- errors in the values for water density.

Sources of **uncertainty** specific to comparison calibrations:

- errors in the calibration of the reference **hydrophone** (a major source of error in a comparison calibration);
- short-term instability of any reference transducers used for comparison calibrations (e.g. instability of the output of a transducer used as a reference source in a comparison calibration);
- instability of the reference **hydrophone** in comparison calibrations (i.e. variation in sensitivity of reference **hydrophone** since previous absolute calibration);
- differences in environmental conditions for the comparison calibration compared with those that existed during the absolute calibration of the reference **hydrophone**, which would cause a change in sensitivity for the reference **hydrophone** (e.g. temperature, soaking, details of **hydrophone** mounting, etc.);
- inaccuracy of any assumptions about the acoustic field produced by a reference source, for example that the field is a spherical wave;
- errors in positioning of the **hydrophones** at the same point within the acoustic field;
- lack of stability in the reference transducer electrical drive conditions, including lack of linearity if it is driven with a signal different to that used in its own absolute calibration;
- differences in environmental conditions for the comparison calibration compared with those that existed during the absolute calibration of the reference transducer, which would cause a change in sensitivity for the reference transducer (e.g. temperature, length of soaking period, details of mounting).

Sources of **uncertainty** common to all of the above methods:

- interference from acoustic reflections, leading to a lack of **free field** conditions;
- lack of acoustic **far field** conditions;
- the spatial averaging effects of the **hydrophones** under calibration due to their finite size and the lack of perfect plane wave conditions;
- misalignment, particularly at high frequencies where the **hydrophone** response can be far from omnidirectional;
- acoustic scattering from the **hydrophone** mount (or vibrations picked up and conducted by the mount);
- errors in measurement of the received voltage (including the accuracy of the measuring instrumentation – voltmeter, digitizers, etc.);
- inaccuracy of the gains of any amplifiers, filters and digitizers used;
- errors in the measurement of drive current or voltage;
- errors due to the lack of linearity in the measurement system (the use of a calibrated attenuator to equalize the measured signals can significantly reduce this contribution);
- inaccuracy of any electrical signal attenuators used;
- electrical noise including radio frequency pick-up;
- inaccuracy of any electrical loading corrections made to account for loading by extension cables and pre-amplifiers;
- bubbles or air clinging to transducers – this should be minimized by adequate wetting and soaking of transducers;
- environmental conditions, such as water temperature. Corrections need not be included for these if the calibration results specify the conditions and state that the calibration is only valid for the conditions stated.

Annex B (informative)

Behaviour of PVDF polymer sensors in high-intensity ultrasonic fields

B.1 General

High-intensity ultrasonic fields are commonly used in biomedical ultrasonics and it is now well established that those high amplitude fields lead to nonlinear phenomena including distortion of the waveform and generation of harmonics in the propagation medium [29],[30],[31]. Wideband, calibrated ultrasonic polymer probes of both the membrane and needle-type have already proved to be the most suitable **hydrophones** for precise measurements of the ultrasonic fields and basic parameters of the **hydrophones** such as frequency response, **directional response** and voltage sensitivity have been described [32]. However, the information on the linearity of the response of the **hydrophones** is rather limited. Linearity is a topic of particular importance for medical applications; modern diagnostic equipment is capable of generating instantaneous pressure amplitudes on the order of 10 MPa [33]. Such amplitudes are only an order of magnitude lower than those encountered in the focal region of extracorporeal shock wave generators (lithotripters).

In addition, linearity in the pressure response of the **hydrophone** is critical for utilization of nonlinear calibration methods [34].

The tests described in Clause B.3 were carried out to determine linearity of ultrasonic **hydrophones** made of PVDF polymer. A partial description of the results discussed was published in [35].

B.2 Theoretical background

The theory of finite amplitude acoustics has many applications in underwater and airborne ultrasound [29]. More recently, the implications of nonlinear propagation phenomena in the biomedical imaging range of frequencies were pointed out [30],[31].

It is well known that the degree of the wave distortion depends on the distance from the source [29]. This relationship provides a practical criterion to distinguish distortions of the waveform due to the nonlinear propagation phenomena, i.e. nonlinearity of the underlying differential formulae and of the propagation medium (here: water). This same practical criterion enables these afore-mentioned distortions to be separated from distortions of the waveform associated with the nonlinear response of the **hydrophone** to the pressure, or possible nonlinear response of the acoustic transmitter or source to voltage excitation. This was used in the tests described in Clause B.3 to ensure that the nonlinearity observed was not associated with a possible nonlinear electroacoustic transfer function.

B.3 Tests

All measurements described here were carried out in a distilled, degassed water at $21,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. The experimental set-up employed different ultrasound sources working in the frequency range 2,25 MHz to 10 MHz, and **hydrophones**, including needle-type and membrane-type designs [32],[36]. Additionally, an optoacoustic device capable of producing shock waves was used [37],[38]. While the ultrasound sources were able to generate pressure amplitudes on the order of 5,5 MPa [corresponding to instantaneous (spatial-peak temporal-peak) intensities on the order of $1\,000\text{ W cm}^{-2}$], the optoacoustic source generated shock waves having peak compressional amplitudes over 10 MPa.

Both sources and **hydrophones** were carefully aligned using an x - y - z micromanipulator system. The signal detected by the **hydrophone** was fed into a spectrum analyser and then displayed on its screen to determine the harmonic contents. Concurrently, the signal was also observed on an oscilloscope and photographs of the propagating waveforms, corresponding to different axial source distances, were taken.

Prior to each set of measurements, it was verified that the wave distortion was due to the nonlinear propagation phenomena and was not caused due to nonlinear dependence of an acoustic port (transmitting surface) versus excitation voltage. As mentioned above, the verification utilized the fact that the acoustic wave distortion depends on the distance from the source and involved recording the transmitted pulse at different axial distances. Those measurements were performed using both needle-type and unbacked membrane-type **hydrophones** [32],[36].

Three different methods were used to determine the linearity of the response of the **hydrophones** with increasing acoustic pressure.

In the first procedure, the linearity of the needle-type calibrated **hydrophones** was tested by observing the increase in the output voltage of the 0,6 mm and 1 mm diameter probes with increasing excitation of the source transducers. The maximum peak compressional pressure measured by the **hydrophones** in the focal region of the transducers used was approximately 5 MPa at 3 MHz.

The second procedure involved the measurement of the total acoustic power generated by a given source. Calibrated miniature polymer **hydrophones** of the needle and membrane type were used to scan the field and the total power radiated was calculated [39]. The results of the calculations were then compared to the results of the measurements taken at the same field locations with an acoustic radiation force balance. These measurements were performed in the frequency range 1 MHz to 2 MHz to minimize errors due to spatial averaging effects.

The third procedure involved the use of an optoacoustic converter. Earlier work [40],[41],[42] on more conventional ultrasonic surgical instruments indicated that such a device should produce a diverging field with pressure amplitudes decreasing in accordance with the $(\text{distance})^{-1}$ law.

NOTE The terms " $(\text{distance})^{-1}$ law", or " $(\text{distance})^{-1}$ behavior", mean that the pressure amplitude behaves in proportion to the reciprocal distance when the distance from the source to the field point considered is increased.

B.4 Results

The linearity measurements described here were carried out using 30 1 mm diameter and 0,6 mm diameter needle-type **hydrophones** [32], and about 10 membrane-type **hydrophones** [32],[36].

In the first procedure, as mentioned above, the linearity of the needle-type calibrated **hydrophones** was tested by gradually increasing the excitation voltage of the 3 MHz source transducer and measuring the corresponding increase in the output voltage of the 0,6 mm and 1 mm diameter needle-type **hydrophones**. A plot of the excitation voltage versus the **hydrophone** signal indicated a linear relationship.

In the second procedure, calibrated miniature polymer **hydrophones** of the needle and membrane type were used to scan the field and the total power radiated was calculated [39]. The results of the calculations were then compared to the results of the measurements taken at the same field locations with an acoustic radiation force balance. For the same acoustic source (either 1,5 MHz or 2,25 MHz), the discrepancy between the acoustic power as measured by the radiation force balance and that determined by using the planar scanning approach was approximately 22 %.

The third procedure involved measurements taken at the output of an optoacoustic converter. In the frequency range 1 MHz to 10 MHz, the waveforms generated by the acoustic sources observed exhibited a shape characteristic for nonlinear propagation phenomena associated with nonlinear properties of the propagation medium. The optoacoustic devices produced waveforms similar to those encountered in the focal region of the commercially available lithotripters. The $(\text{distance})^{-1}$ behavior of the devices was experimentally confirmed – the maximum pressure amplitude measured was in the order of 10 MPa and the deviation from $(\text{distance})^{-1}$ characteristics was within the experimental **uncertainty** (15 %) [38].

Any discrepancy from the $(\text{distance})^{-1}$ law exceeding the overall **uncertainty** of the measurements would imply a possibility of nonlinearity in the **hydrophone's** response. However, no such discrepancy was observed with both membrane and needle-type **hydrophones** [38].

B.5 Conclusions

The linearity of the pressure response for a number of PVDF polymer **hydrophones** was determined. Measurements were performed at the pressure amplitude levels on the order of 10 MPa. Different test procedures were employed and the results obtained using acoustic transducers indicated that the nonlinearities observed were clearly associated with the wave propagation only. An excellent agreement between the different designs of **hydrophone**, polymer needle-type and unbacked membrane-type, was obtained.

Furthermore, no discrepancy from the $(\text{distance})^{-1}$ law exceeding the overall **uncertainty** of the measurements was observed with both membrane- and needle-type **hydrophones**. As pointed out in Clause B.4, such discrepancy would imply nonlinearity of the pressure response with increasing acoustic pressure.

The pressure amplitudes in the tests described in Clause B.3 were limited to approximately 10 MPa. Additional evidence supporting the results described in Clause B.4 emerges from the testing of the specially designed PVDF **hydrophones** for underwater acoustic applications [43],[44]. Negligible changes, within 0,6 dB, in the frequency response of the **hydrophones** were observed up to hydrostatic pressures of 69 MPa.

Based on the results of these preliminary tests and on the information published in [43],[44], it can be concluded that the polymer **hydrophones** show excellent linearity over a range in intensities typical of those encountered in pulse-echo imaging systems [33].

In addition, the pressure-time waveforms measured in the focal region of the lithotripters do not exhibit any unexpected behavior. The pressures encountered in the focal region of those lithotripters can be on the order of 100 MPa and the shape of the shock waves measured remained unchanged with decreasing excitation voltage or voltage applied to the electrodes in the electrohydraulic system. While this does not constitute a rigorously obtained proof supporting linear response of the PVDF material, on the other hand, there is currently no evidence to indicate that any nonlinearity in the pressure response of an appropriately designed ultrasonic PVDF **hydrophone** would exist in the range up to approximately 70 MPa.

Annex C (informative)

Electrical loading corrections

C.1 General

The sensitivity of a **hydrophone** is often specified as the **end-of-cable open-circuit sensitivity**. This is the sensitivity of the **hydrophone** at the end of its cable when not connected to an electrical load. When a specific electrical load, such as an oscilloscope, an amplifier, or an extra cable is used at the output of the **hydrophone**, the **end-of-cable loaded sensitivity** of the **hydrophone** can be related to the **end-of-cable open-circuit sensitivity** in the following way.

C.2 Corrections using complex impedance

Consider the general case in which the **hydrophone** is considered as a two-terminal network of complex electric output impedance of a **hydrophone**, $\underline{Z}_H$, connected to a complex **electric load impedance** $\underline{Z}_L$. The **end-of-cable loaded sensitivity** of the **hydrophone**, $\underline{M}_L$, when connected to the specified load, is related to the **end-of-cable open-circuit sensitivity**, $\underline{M}_c$, by

$$\underline{M}_L = \underline{M}_c \frac{\underline{Z}_L}{\underline{Z}_L + \underline{Z}_H} \quad (\text{C.1})$$

Then, the modulus of the **end-of-cable loaded sensitivity** of the **hydrophone**, $|\underline{M}_L|$, when connected to the specified load, is related to the modulus of the **end-of-cable open-circuit sensitivity**, $|\underline{M}_c|$, by

$$|\underline{M}_L| = |\underline{M}_c| \sqrt{\frac{\text{Re}(\underline{Z}_L)^2 + \text{Im}(\underline{Z}_L)^2}{[\text{Re}(\underline{Z}_L) + \text{Re}(\underline{Z}_H)]^2 + [\text{Im}(\underline{Z}_L) + \text{Im}(\underline{Z}_H)]^2}} \quad (\text{C.2})$$

where $\text{Re}(\)$ and $\text{Im}(\)$ denote the real and imaginary parts of the relevant complex impedance. Often, the electrical load can be assumed to be a parallel combination of a resistance, R_L , and capacitance, C_L . In this case, $\text{Re}(\underline{Z}_L)$ and $\text{Im}(\underline{Z}_L)$ are given by

$$\text{Re}(\underline{Z}_L) = \frac{R_L}{1 + \omega^2 C_L^2 R_L^2} \quad (\text{C.3})$$

and

$$\operatorname{Im}(\underline{Z}_L) = \frac{-\omega C_L R_L^2}{1 + \omega^2 C_L^2 R_L^2} \quad (\text{C.4})$$

where

ω is the circular frequency.

C.3 Corrections using only capacitances

A further simplification is possible if the impedances of both the **hydrophone** and the load can be assumed to be capacitive. This is often a valid assumption for a **hydrophone** at frequencies much less than the resonance frequency and for loads such as extension cables. In this case, if C_H is the end-of-cable capacitance of the **hydrophone** including any integral cable and connector, Formula (C.2) reduces to

$$|\underline{M}_L| = |\underline{M}_c| \left[\frac{C_H}{C_H + C_L} \right] \quad (\text{C.5})$$

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62127-2:2025

Annex D (informative)

Absolute calibration of hydrophones using the planar scanning technique

D.1 Overview

This Annex D provides a detailed description of the methodology relating to the calibration of **hydrophones** using the planar scanning technique. It provides guidance on the options for mechanical scanning of the **hydrophone** and on evaluating important sources of calibration **uncertainty**.

D.2 Hydrophone scanning methodology

There are several ways of scanning a **hydrophone** over the plane $z = l$ in the ultrasonic beam. The most comprehensive is to obtain a rectangular array of sample points by moving the **hydrophone** in a two-dimensional raster scan. In this case:

$$\iint \left[\overline{U_L(x, y, l, t)} \right]^2 dy dx \approx \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left[\overline{U_L(xm, yn, l, t)} \right]^2 \Delta y \Delta x \quad (D.1)$$

where

M and N are the number of sample points in the y and x directions, respectively; and
 Δx and Δy are the step sizes in the x and y directions, respectively.

An alternative scanning procedure is possible if the beam profile from the transducer can be assumed to be approximately cylindrically symmetrical. In this case, a number of **diametrical beam scans** can be performed. These scans should pass through the ultrasonic **beam centre** and be spaced at equal angular increments. For example, if two scans are performed, they should be at 90° to each other. For N **diametrical beam scans** we have:

$$\iint \left[\overline{U_L(x, y, l, t)} \right]^2 dy dx \approx \left(\frac{\pi}{N} \right) \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{r=R_{1i}}^{R_{2i}} \left[\overline{U_L(l, r)} \right]^2 r \Delta r + \left[\overline{U_L(l, s)} \right]^2 \left(\frac{\Delta r}{2} - s \right)^2 \right\} \quad (D.2)$$

where

r is the distance of each scan point from the ultrasonic **beam centre** (equal to $(y^2 + x^2)^{1/2}$ if the **beam centre** is chosen at the origin of the y, x -coordinate system);
 Δr is the step size;
 R_{1i} and R_{2i} are the distances from the **beam centre** to the extremes of the i th **diametrical beam scan**;
 s is the distance from the ultrasonic **beam centre** to the nearest scan point.

The second term on the right-hand side of Formula (D.2) represents the contribution to the total integral from the ultrasonic **beam centre**.

NOTE Formula (D.2) does not assume that a scan point coincides with the **beam centre** or that scan points are equally spaced from the **beam centre**.

D.3 Corrections and sources of measurement uncertainty

D.3.1 Total power

For the measurements referred to in Clause 10, the **hydrophone** is positioned at a distance $z = l$ from the transducer, in which case a correction to the total ultrasonic output power emitted by the transducer, P_o , (assumed to be at $z = 0$) should be made for the attenuation of the water path using the expression:

$$P(l) = P_o \exp(-2\alpha z) \quad (\text{D.3})$$

where

P_o is the total ultrasonic output power emitted by a transducer;

$P(l)$ is the total power in the ultrasonic beam at the **hydrophone**;

α is the amplitude attenuation coefficient of plane waves in a medium (usually water).

Annex E provides values for the temperature- and frequency-dependent attenuation for use in Formula (D.3).

There are three sources of **uncertainty** in the value for the total power in the ultrasonic beam at the **hydrophone** $P(l)$ and an estimate should be made of each one. First, there is the systematic **uncertainty** in the determination of the total output power, P_o , either from a standard transducer or from a transducer whose output power has been measured using the radiation force measurement technique (see IEC 61161).

The second source of **uncertainty** is due to possible differences between the total output power from the transducer during the beam scanning procedure and the measured or assumed (for a standard transducer) output power. The magnitude of this **uncertainty** can be estimated from previous knowledge of the stability of the transducer. This **uncertainty** should be determined separately for each transducer that is used.

The final source of **uncertainty** in the determination of total power arises from the correction for the attenuation of water. Uncertainties occur both in the attenuation coefficient α/f^2 , which should be taken as $\pm 1,7\%$ at all temperatures (see [45] and [46]), and also in the determination of the distance l between the transducer and the **hydrophone**. This separation can be determined by measuring the time delay recorded on an oscilloscope between the excitation of the ultrasonic transducer and the reception of the signal at the **hydrophone**.

D.3.2 Received hydrophone signal

The magnitude of the **hydrophone** signal $U_L(x, y, l, t)$ is generally determined using an oscilloscope, digitizer or any other appropriate system, and the **uncertainty** in the measurement of this signal should be determined. The **uncertainty** will depend on the harmonic content of the **hydrophone** signal, the frequency response of the **hydrophone** and the method used to determine the **hydrophone** signal.

It has been shown that planar scanning undertaken on distorted waveforms leads to significant calibration errors [47]. These errors are largest if the peak-positive acoustic peak is used for measuring the **hydrophone** signal and decrease if either the peak-to-peak or peak-rarefactional acoustic pressure is used.

D.3.3 Integration

It is essential to have adequate sampling of the beam in the planar scanning technique. For **diametrical beam scans**, and assuming cylindrical symmetry, it can be shown using an analysis similar to that in [45] provided that there are at least seven sample points between (and including) the two points 6 dB below the peak of the acoustic pressure beam profile (or five points between the 6 dB points on the pressure squared profile), the **uncertainty** in the **hydrophone** sensitivity arising from the numerical integration is less than 1 %. If a raster scanning technique is used, it can be shown that, if both M and N in Formula (D.1) are chosen such that both the beam scans passing through the beam centre in the y and x directions contain at least seven sample points between (and including) the two points 6 dB below the peak of the acoustic pressure beam profile, the **uncertainty** in the **hydrophone** sensitivity arising from the numerical integration is less than 1 %. An assessment shall be made of the **uncertainty** caused by a finite number of sample points.

In the case of **diametrical beam scans**, the assumption of cylindrical symmetry can be tested by analysing the data from each radial part of the scan separately in Formula (D.4):

$$\sum_{j=0}^{j_{\max}} [U_L(l, r, j)]^2 r_j \Delta r \quad (\text{D.4})$$

where

r_j is the distance from the **beam centre** to the scan point;

$j_{\max}$ is the number of the farthest scan point in a radial scan

NOTE It is assumed here that each diametrical scan has been decomposed into two radial (or half) scans, with the data being analysed separately.

The percentage difference between the maximum and minimum of these values shall be determined and one-half of this value shall be used to determine the **uncertainty** introduced from the assumption of cylindrical symmetry when **diametrical beam scans** are used.

D.3.4 Directional response

A correction for the **directional response** of the **hydrophone** shall be made by calculation unless the **directional response** of the **hydrophone** is not predictable. In the latter case, the procedure shall be to alter the angle of the **hydrophone** to obtain maximum output voltage at each point in the scan. It is possibly not essential to optimize the rotation for each scan position, especially if the separation between sample points represents a small change in the angle of incidence of the ultrasound on the **hydrophone**. The procedure based on calculation shall be as follows. First, the **directional response** of the **hydrophone** should be determined at the frequency f . Let the normalized **directional response** function be $D(\theta_1)$, where θ_1 represents the angular orientation. To correct the measurements referred to above, the **hydrophone** signal

$U_L(x, y, l, t)$ shall be divided by the factor $D(\theta_1)$, where $\theta_1 = \arctan \left[(x^2 + y^2)^{1/2} / l \right]$.

Methods of determining the **directional response** of **hydrophones** are specified in 12.5.

D.3.5 Finite size of the hydrophone

An estimate shall be made for the **uncertainty** caused by the finite size of the active element of the **hydrophone**. A **hydrophone** responds to the integral of the acoustic pressure over its active element, and therefore a correction for spatial averaging can be necessary [13],[14],[48],[49],[50]. An estimate of the magnitude of this correction shall be obtained by calculating the difference between the acoustic pressure at a point in the field and the pressure averaged over the **hydrophone** surface ([48], IEC 62127-1). For the purposes of this calculation, the effective area of the **hydrophone** shall be used to define the extent of the **hydrophone** surface. The effective area can be determined from the **effective size** of the **hydrophone** active element, which shall be determined using the procedures specified in 12.5. Contributions to the integrations in the planar scanning process [Formula (15)] are largest from the centre of the beam; therefore, it is only necessary to determine the **uncertainty** and apply a correction for regions near the centre of the ultrasonic beam. It is usually preferable to perform measurements at a distance l from the transducer such that the spatial averaging effect at the centre of the beam is less than 5 %.

D.3.6 Noise

In general, the **hydrophone** is scanned to a distance from the ultrasonic **beam axis** until no signal is observed above the noise. To apply a correction to the integral of the square of the **hydrophone** signal to account for the contribution from the noise, the noise level shall first be determined. The noise level shall be determined by repeating the whole scanning process with the transducer turned off and measuring the RMS noise level at each point. The RMS noise level, $U_n(x, y, l)$, shall be subtracted from the measured signals in the following manner. If the average value of the square of the **hydrophone** signal is

$$\overline{[U_L'(x, y, l, t)]^2} \quad (D.5)$$

then the average value of the **hydrophone** signal after correcting for the contribution from noise is

$$\overline{U_L(x, y, l, t)^2} = \overline{[U_L'(x, y, l, t)]^2} - U_n^2(x, y, l) \quad (D.6)$$

With the **hydrophone** at the distance corresponding to the limit of the planar scanning process, an ultrasonic signal below the noise level can be present. In this case, the magnitude of the contribution from outside the scanning region (that omitted in the integration) shall be determined using a theoretical model of the ultrasonic beam. In the **far field** region of a circular plane piston source, the pressure at a point R is proportional to:

$$2J_1(ka_t \sin \theta) / (ka_t \sin \theta) \quad (D.7)$$

where

k is the circular wave number;

a_t is the **effective radius of a non-focusing ultrasonic transducer** (or geometrical radius of the non-focusing ultrasonic transducer);

θ is the angle between the line connecting the point R to the centre of the transducer and the **beam axis**, see also Clause 4;

J_1 is a Bessel function of the first kind of first-order.

This model assumes a spherical scan and hence the contribution omitted shall be determined by integration of this theoretical distribution (squared) over a spherical region defined from the edge of the planar scanning region and compared with the total integral over a hemisphere. The contribution to the integral from outside the scanning region in the planar scanning procedure shall be assumed to be the same as that obtained from the spherical scan model. This contribution shall be used as a correction to the integration, and an **uncertainty** equal to the correction shall be assigned. This **uncertainty** is usually small compared to other components.

It can be preferable to scan out to a certain threshold below the peak signal at the centre of the ultrasonic beam, for example 10 % [43] or 5 % [51]. In this case, the contribution from outside the scanning region will be significant and a correction factor shall be determined by using the same procedure as given above.

The geometrical radius may be used instead of the **effective radius of the non-focusing ultrasonic transducer** if the latter is not known.

NOTE The significance of the contribution due to noise to the integration depends on the method of measurement of the **hydrophone** signal.

D.3.7 Nonlinear propagation

The planar scanning technique determines the sensitivity of a **hydrophone** at a particular frequency f . It is important that the ultrasonic wave used is not distorted by the introduction of high-frequency components due to nonlinear propagation. For the purpose of estimating the significance of nonlinear propagation to the planar scanning calibration method, two procedures are given here, the choice depending on the particular measurement procedures and on the **hydrophone** being calibrated. Essentially, both assume that the **uncertainty** introduced by nonlinear distortion depends on the loss in amplitude of the fundamental frequency component in the acoustic pressure waveform. The first procedure assumes that the amplitude of the second harmonic is a certain percentage δ of the fundamental amplitude. In this case, the percentage error in the determination of the **hydrophone** sensitivity for $\delta < 30$ % is (see D.4.5)

$$\frac{1}{2} \frac{\delta^2}{100} \quad (\text{D.8})$$

Although a simple procedure, it can be impossible to determine δ reliably owing to variation in **hydrophone** sensitivity between the fundamental and second harmonic frequencies or, at high frequencies, because the acoustical attenuation in water has not been taken into account.

The second procedure assumes that the nonlinear propagation can be predicted in the case of a plane piston ultrasonic transducer. As shown in D.4.5, for the **far field** of a transducer emitting a total ultrasonic power P_o under continuous wave conditions, the error in the determination of the **hydrophone** sensitivity is approximately:

$$P_o (0,28R + 0,065) f^4 a_t^2 10^{-20} \quad (\text{D.9})$$

with

$$R = l\lambda / (\pi a_t^2) \quad (\text{D.10})$$

where

f is the frequency in hertz; and

a_t is the **effective radius of a non-focusing ultrasonic transducer** in metres.

This relationship is accurate if the error is less than 5 % and again attenuation is neglected (see Annex E).

The above estimates are based on the assumption that the signal at the second harmonic frequency is not detected and that the effect of attenuation on nonlinear propagation is small. If a **hydrophone** with a flat frequency response is used, then this analysis will overestimate for the error.

An **uncertainty** estimate shall be made using the relationship given above and these shall be used as an upper limit to the error caused by distortion of the waveform of the **hydrophone** signal. The error shall be less than 5 %.

D.3.8 Planar scanning

Strictly, the derivation of Formula (15) from Formula (11) should refer to an integration over a spherical surface centred at the ultrasonic transducer. The error introduced by using planar scanning at each point in the scan is proportional to $\left(\frac{1}{\cos \theta} - 1\right)$, where θ is the angle between the ultrasonic **beam axis** and the line joining the centre of the ultrasonic transducer to the **reference centre** of the active element of the **hydrophone**. Providing θ at the edges of the planar scan is less than about 10° the **uncertainty** from using a planar scan is negligible [45]. If the angle is larger, an estimate of the **uncertainty** shall be made.

D.3.9 Intensity proportional to pressure squared

Formula (10) assumes that the **instantaneous intensity** is proportional to the square of the acoustic pressure. An estimate for the difference between the true **instantaneous intensity** I and the **derived instantaneous intensity** I_p , derived from the square of the acoustic pressure on the axis of a circular plane piston ultrasonic transducer, can be made from the following Formula [25]:

$$\frac{I_p}{I} = \frac{2}{1 + \left(\frac{l}{a_t}\right) / \left[1 + \left(\frac{l}{a_t}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{D.11})$$

For the measurement distances recommended in 10.4.4 and for the range of transducer diameters normally encountered (6 mm to 25 mm), this ratio differs from unity by less than 1 %. If distances are chosen that are less than those recommended in 10.4.4, Formula (D.11) shall be used to estimate the contribution from this source of **uncertainty**.

D.4 Rationale behind the planar scanning technique for calibrating hydrophones

D.4.1 General

This Clause D.4 provides an outline of the derivation and justification of some of the conditions and formulae used in the planar scanning technique.

D.4.2 Relationship between hydrophone and transducer effective radii

Consider a plane piston transducer of effective radius a_t and a **hydrophone** of effective radius a_h placed at a distance l from the transducer.

The edge wave from the transducer will be incident at an angle at the **hydrophone** given by

$$\arcsin \left[\frac{a_t}{\left(a_t^2 + l^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (\text{D.12})$$

If the **hydrophone** is assumed to have a **directional response** given by

$$2J_1(ka_h \sin(\theta)) / ka_h \sin(\theta) \quad (\text{D.13})$$

where k is the circular wave number ($= 2\pi/\lambda$) and θ is the angle of incidence, then the edge waves should be incident at an angle corresponding to less than 1 dB below the peak of the **directional response**. For the **directional response**, this requires that $ka_h \sin(\theta) \leq 1$ (i.e. if $ka_h \sin(\theta) = 1$ then $[2J_1(ka_h \sin(\theta)) / ka_h \sin(\theta)] \cong 0,88$). Hence, this is equivalent to

$$ka_h \sin(\theta) \leq 1 \quad (\text{D.14})$$

or

$$\frac{k a_h a_t}{\left(a_t^2 + l^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \leq 1 \quad (\text{D.15})$$

D.4.3 Justification for $a_t / l \leq 0,5$

It can be shown [25] that the true intensity at an axial distance l from a plane piston source differs from the derived intensity determined assuming the "pressure squared" relationship by approximately 6 % for $a_t / l = 0,5$. At axial positions closer to the transducer, the "pressure squared" derived intensity rapidly increases compared with the true intensity. Consequently, the limit of validity of Formula (10) for the purposes of this document is taken as $a_t / l \leq 0,5$.

D.4.4 Derivation of Formula (D.2)

Consider the distribution of points $U_L(l, r)$ between R_{1i} and R_{2i} , the distances from the **beam centre** to the extremes of the i th **diametrical beam scan**. Let s be the distance from the ultrasonic **beam centre** to the nearest scan point. Considering each point as contributing to an annulus, the integration of the **diametrical scan** is given by:

$$\sum_{r=R_{1i}}^{R_{2i}} \pi [U_L(l, r)]^2 r \Delta r \quad (D.16)$$

NOTE The summation formulae presented within this Clause D.4 do not follow normal mathematical convention. Here, the limits given indicate the extrema of the summation. In between these extremes, the parameter r in Formula (D.16) takes on discrete values which correspond to the descriptors of the specific scan points.

However, the central point $U_L(l, s)$ does not contribute an annulus centred on the **beam axis** in the same way as all other points. In this case, the contributions from the two semi-circles disposed about the central point should be considered separately. The total contribution from the point $U_L(l, s)$ to the diametrical summation is

$$\frac{\pi}{2} [U_L(l, s)]^2 \left[\left(\frac{\Delta r}{2} - s \right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{2} + s \right)^2 \right] \quad (D.17)$$

As Formula (D.16) already contains a term for the point $U_L(l, s)$, a correction to Formula (D.16) should be applied, given by the difference between the true contribution from the centre point and the term included in Formula (D.16), i.e.

$$\frac{\pi}{2} [U_L(l, s)]^2 \left[\left(\frac{\Delta r}{2} - s \right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{2} + s \right)^2 \right] - \pi [U_L(l, s)]^2 s \Delta r \quad (D.18)$$

which reduces to

$$\pi [U_L(l, s)]^2 \left[\left(\frac{\Delta r}{2} - s \right)^2 \right] \quad (D.19)$$

This is the last term in Formula (D.2).

If the point $U_L(l, s)$ corresponds to the centre of the beam, then $s = 0$ and the braces (curly brackets) in Formula (D.2) reduce to

$$\sum_{r=R_{1i}}^{R_{2i}} [U_L(l, r)]^2 r \Delta r + [U_L(l, 0)]^2 \frac{\Delta r^2}{4} \quad (D.20)$$

NOTE As the term within the summation for the point at the centre of the beam is zero [$r = 0$ for $U_L(l,0)$], the right-hand term corresponds to the contribution from the centre of the beam.

D.4.5 Effect of nonlinear propagation, D.3.7

The derivation of the Formula (D.9) dealing with nonlinear propagation is outlined below.

A useful approximation to the finite amplitude field of a plane piston radiator at distances of the order of, and greater than, the normalized distance, $R = l\lambda / (\pi a_t^2)$ is to model the beam profile by a Gaussian function.

For small amounts of distortion, the ratio of the amplitude of the fundamental frequency component of the wave on the acoustic axis to the amplitude in the absence of distortion is given by [52]:

$$1 - \frac{\sigma^2}{8} \quad (D.21)$$

with

$$\sigma = \left(\frac{7 p_1 \pi^2 a_t^2}{\lambda^2 \rho c^2} \right) 2 \sin \left(\frac{1}{2R} \right) \left(1 + R^2 \right)^{\frac{1}{2}} \ln \left[R + \left(1 + R^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (D.22)$$

where p_1 is the acoustic pressure amplitude at the face of the ultrasonic transducer and is related to the total ultrasonic power emitted by a transducer, P_o , by

$$P_o = \frac{\pi p_1^2 a_t^2}{4 \rho c} \quad (D.23)$$

The pressure amplitude for off-axis positions and low amplitudes ($\sigma < 0,5$) is obtained by multiplying σ by the directivity function of the transducer [53] and thus, assuming a Gaussian beam profile, the square root of the integral of the square of the acoustic pressure relative to that in the absence of distortion is given by

$$1 - \frac{\sigma^2}{16} = \left[\frac{2\pi \int \left[1 - \left(\frac{\sigma^2}{4} \right) \exp \left(-\frac{2r^2}{a_t^2 (1 + R^2)} \right) \right] \exp \left(-\frac{2r^2}{a_t^2 (1 + R^2)} \right) r dr}{2\pi \int \exp \left(-\frac{2r^2}{a_t^2 (1 + R^2)} \right) r dr} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (D.24)$$

and hence the percentage error in the calibration of a **hydrophone** is given by

$$100 \frac{\sigma^2}{16} = 100 \left(\frac{49 \pi^3 a_1^2 P_o}{\lambda^4 \rho c^3} \right) \sin^2 \left(\frac{1}{2R} \right) (1 + R^2) \left\{ \ln \left[R + (1 + R^2)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}^2 \quad (\text{D.25})$$

If R is in the range 0,5 to 3, then Formula (D.25) can be approximated by Formula (D.9).

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62127-2:2025

Annex E (informative)

Properties of water

E.1 General

Table E.1 – Speed of sound c [54],[55] and specific acoustic impedance, ρc , as a function of temperature, for propagation in water

Temperature °C	Speed of sound c m s ⁻¹	Specific acoustic impedance ρc × 10 ⁶ kg m ⁻² s ⁻¹
15	1 465,9	1,464 7
16	1 469,4	1,467 9
17	1 472,8	1,471 0
18	1 476,1	1,474 0
19	1 479,2	1,476 9
20	1 482,4	1,479 6
21	1 485,4	1,482 3
22	1 488,3	1,485 0
23	1 491,2	1,487 5
24	1 494,0	1,490 0
25	1 496,7	1,492 3
26	1 499,4	1,494 6
27	1 501,9	1,496 7
28	1 504,4	1,498 8
29	1 506,8	1,500 8
30	1 509,2	1,502 6
31	1 511,4	1,504 4
32	1 513,6	1,506 2
33	1 515,8	1,507 8
34	1 517,8	1,509 4
35	1 519,9	1,510 8
36	1 521,8	1,512 2
37	1 523,7	1,513 6
38	1 525,5	1,514 8
39	1 527,2	1,516 0
40	1 528,9	1,517 1

E.2 Attenuation coefficient for propagation in water

The value of α in the megahertz frequency range is proportional to f^2 and should be taken from the following polynomial fit as a function of temperature T (valid in the range 0 °C to 60 °C) [46]:

$$\alpha / f^2 = \begin{pmatrix} 56,85 - 3,025\{T\} \\ +1,174 \times 10^{-1} \{T\}^2 \\ -2,954 \times 10^{-3} \{T\}^3 \\ +3,970 \times 10^{-5} \{T\}^4 \\ -2,111 \times 10^{-7} \{T\}^5 \end{pmatrix} \times 10^{-15} \text{Hz}^{-2} \text{m}^{-1} \quad (\text{E.1})$$

NOTE $\{T\}$ denotes the numerical value of the temperature in °C.

If the amplitude attenuation coefficient in m^{-1} is going to be given in dB m^{-1} , its numerical value is multiplied by $20 \log_{10}(e) \approx 8,69$.

Procedures to prepare degassed water are given in IEC TR 62781 [56].

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62127-2:2025

Annex F (informative)

The absolute calibration of hydrophones by optical interferometry

F.1 Overview

This Annex F describes the current status of absolute methods of calibration for ultrasonic **hydrophones** appropriate for frequencies also above 15 MHz. The basis of some of the methods that have been used in the past, as well as those currently under evaluation, are briefly described in Clause F.2. These are based on the nonlinear propagation of plane waves and optical interferometry. The latter method in particular is attractive, as calibrations can be made directly traceable to primary standards of length measurement. Thus, at a handful of national metrology institutes (NMIs), the primary standard for realizing the acoustic pascal involves the application of optical interferometry to measure the acoustic displacement or velocity of a thin optically reflective membrane. This Annex F also describes such absolute calibration methods within different implementations. The fundamental difference between the implementations I (F.2.3.1) and II (F.2.3.2) on the one hand and implementation III (F.2.3.3) on the other hand lies in the disposition of the acoustic and laser beams. In implementation III, in direct contrast to implementations I and II, the optical beam traverses the acoustic beam, whereas in implementation I and II acoustic reflection is incorporated.

NOTE "Absolute" **hydrophone** calibration is understood here in the sense of "without reference to another **hydrophone**". This is sometimes also referred to as "primary" calibration. On the other hand, **hydrophones** are often calibrated in practice following a "secondary" or "substitution" procedure, which means a sensitivity comparison with a calibrated reference **hydrophone**. The reference **hydrophone** itself will possibly have been calibrated in "absolute" terms or against another reference **hydrophone**, and so on. Obviously, there are two different, fundamental procedures: to perform an absolute **hydrophone** calibration and to compare the sensitivity of two **hydrophones**. This Annex F deals with the former procedure. The latter procedure is dealt with in detail in Clause 12. A substitution calibration usually involves both procedures and users can refer to both Clause 12 and this Annex F. **Uncertainties** from both fundamental procedures contribute to the final calibration **uncertainty** in the case of a substitution calibration.

F.2 Present position

F.2.1 "Magnomic" or nonlinear propagation-based method

In the past, work has been undertaken to calibrate **hydrophones** at frequencies as high as 100 MHz using the so-called "magnomic" or "empirical nonlinear propagation model" method [52],[57],[58],[59],[60],[61]. The method is described in [52]. This utilizes a nonlinear propagation model for plane waves and exploits the fact that, for a piston transducer of relatively large diameter, suitable time-gating of the acoustic signal can isolate the plane wave component from the edge wave radiated from the piston edge. At high-pressure amplitudes, these plane waves undergo finite amplitude distortion, producing an acoustic field rich in harmonics. A theoretical plane wave propagation model is used to predict the distortion of these sound waves, and by comparing the predictions with measurements made close to the face of the transducer (undistorted) and at a known distance further along the axis (distorted and made harmonically rich by nonlinear propagation), a calibration of the **hydrophone** can be obtained at each harmonic frequency.

Results obtained from this method were promising and agreed well with the theoretical response of two membrane **hydrophones**. It does, however, have some disadvantages. First, it depends crucially on the propagation model used. Secondly, the method depends on the performance of the transducer used to generate the acoustic field. Owing to transducer imperfections, the field produced can deviate significantly from the desired plane waves, leading to significant **uncertainties** in the calibration.

Methods employing a smaller diameter focusing transducer to generate harmonics in a focal plane overcome some of these disadvantages. Measured fields are more reproducible at a known focal length distance where there is a well-defined main beam lobe. The focal gain of the transducer can provide higher pressures full of harmonics in a shorter distance than distances used for the plane wave approach. Suitable focusing transducers with uniform properties are commercially available.

F.2.2 Optical interferometry

In the calibration method based on optical interferometry, the acoustic field produced by a transducer is detected using a thin plastic membrane (known as a pellicle or foil) metallized on one side to be optically reflecting. The pellicle is thin enough to be acoustically transparent and follows the motion of the acoustic wave, its displacement being measured using optical interferometry and the acoustic pressure being derived from the measured displacement. The **hydrophone** to be calibrated is substituted for the pellicle with the **acoustic centre** of the **hydrophone** positioned at the same point in the acoustic field interrogated by the laser beam. The **hydrophone** is then calibrated by measuring the output voltage corresponding to the known acoustic pressure.

Clearly, an important requirement for a viable calibration method is that the acoustic pressure is sufficient for the **hydrophone** signal to have an acceptable signal-to-noise ratio at the frequency of interest, i.e. up to 40 MHz. However, the optical interferometer actually senses acoustic displacement and this imposes a more severe requirement for an acceptable signal-to-noise ratio. For a plane wave, the acoustic pressure amplitude p_0 is given by

$$p_0 = \rho c \omega \zeta \quad (\text{F.1})$$

where

- ρ is the (mass) density of the measurement liquid (water);
- c is the speed of sound in the medium;
- ω is the circular frequency;
- ζ is the amplitude of the acoustic displacement, with the difference in phase between pressure and displacement being ignored.

Ignoring the difference in phase between pressure and displacement means that for a given acoustic pressure, the displacement amplitude is reciprocally related to the frequency so that high acoustic pressures are required to generate a measurable displacement at frequencies of 40 MHz and above. Note that the three implementations described in F.2.3.1, F.2.3.2 and F.2.3.3 employ focusing transducers in order to effect an increase in acoustic pressure.

F.2.3 High-frequency implementations of optical interferometry

F.2.3.1 Implementation I

F.2.3.1.1 Measurement system

The optical calibration technique is based on measurement of the displacement of a membrane that is positioned at the surface of a liquid containing a transducer (Figure F.1). The generated sound wave is normally incident and displaces the membrane, which is measured using a Michelson interferometer [62],[63],[64],[65],[66],[67]. It contains a laser as a light source and a polarizing beam splitter for dividing and combining the optical field (Figure F.1). In the measuring arm, the light is focused onto the foil, which is coated with an aluminium layer to improve the optical reflectivity. The focusing ensures a small spot diameter for a sufficient spatial resolution.

A balanced photodetection scheme with a bandwidth of approximately 100 MHz detects the optical output field. It consists of two photodiodes and a difference transimpedance amplifier, A_V , suppressing amplitude noise and increasing the photocurrent. The transimpedance amplifier is followed by a second amplifier V . It has a high input impedance and can be used as a **hydrophone** amplifier (see below). In the realization considered here, the interferometer is path-stabilized [64] by a servo-loop with a unity-gain frequency of about 100 Hz. In this case, the displacement is obtained from the measured photocurrents by

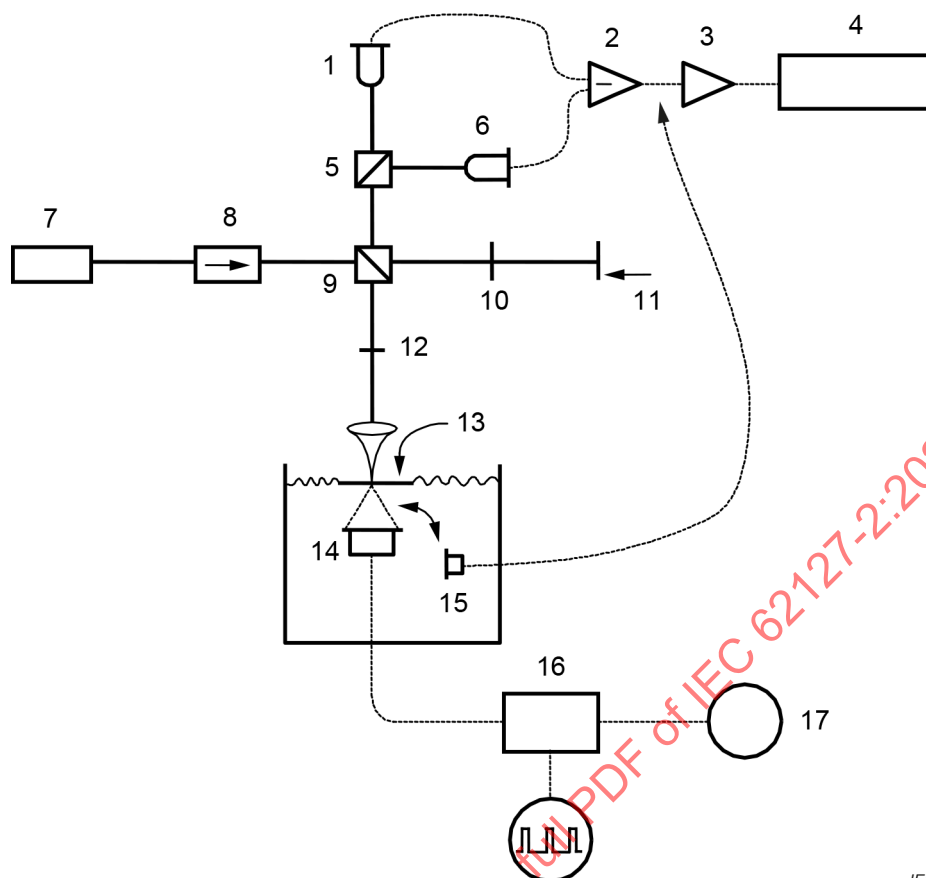
$$\zeta = \frac{U_S \lambda_l}{2\pi T \bar{U}} \frac{V(f=0)}{V(f)} \quad (\text{F.2})$$

where

- λ_l is the optical **wavelength** (the **wavelength** of light in vacuum);
- T is the acoustic transmission factor of the displacement through the foil;
- U_S is the voltage of the signal;
- $\bar{U}$ is the peak-to-peak voltage of a complete interferometer fringe measured at the output of the amplifier V , which has the frequency-dependent gain $V(f)$.

The output voltage U_S is detected by a digital scope, i.e. in the time domain with wide bandwidth larger than 100 MHz. To achieve a sufficiently high signal-to-noise ratio, a focusing piezoelectric broadband transducer is used. It is supplied with a burst of a given frequency and the measurement data are acquired immediately after the onset of the ultrasound when the steady state is reached. This avoids disturbances by reflection at the tank walls.

The alignment is carried out using a three-axis translation and a rotation by two axes. The laser spot is adjusted at the focus perpendicular to the **beam axis**, which is determined by two-dimensional pressure measurements at different distances from the transducer. As alignment criteria, the maximum of the interferometer output and the reflected acoustical signal, and the delay time between the excitation pulse and the output signal, are sufficient for the translation alignment. The angle between the foil and the sound propagation direction is adjusted using the aligned laser beam as a reference.



IEC

Key

1: PD	photodiode
2: A_V	transimpedance amplifier
3: V	hydrophone amplifier
4: D-scope	digital oscilloscope
5: BS	beam splitter
6: PD	photodiode
7:	laser
8: ISO	optical isolator
9: PBS	polarizing beam splitter
10: $\lambda/4$	lambda-quarter plate
11: PZT-M	piezo-driven mirror
12: $\lambda/4$	lambda-quarter plate
13: Fo	foil
14: Tr	acoustical transducer
15: H	hydrophone
16:	gate
17: $\tilde{f}$	synthesizer

Figure F.1 – Experimental set-up of the interferometric foil technique

After storage of the reference data, the foil is removed and the **hydrophone** in question is fixed at the same place as the laser spot before. A certain amount of water is added to immerse the **hydrophone**. Alternatively, the transducer can be rotated as is shown in Figure F.1, for simplicity. The **hydrophone** is connected with the input of the amplifier V. Then the measurement is repeated under identical excitation conditions.

The modulus of the **end-of-cable loaded sensitivity** M_L is obtained by

$$M_L = \frac{1}{\omega c \rho V(f=0)} \frac{2 \pi T \vartheta}{\lambda} \frac{U_H}{U_S} \quad (\text{F.3})$$

where

- c is the speed of sound in water;
- ρ is the (mass) density of the measurement liquid (water);
- U_H is the voltage of the **hydrophone** measurement;
- $\omega (= 2\pi f)$ is the circular frequency of the sound field.

Here, the **hydrophone** output is electrically loaded by the input impedance of the amplifier V.

F.2.3.1.2 Data correction

The determination of the modulus of **end-of-cable loaded sensitivity** M_L is influenced by three systematic effects, which require data correction using theoretical models as follows.

F.2.3.1.3 Spot diameter

Both the **hydrophone** and the laser beam focused on the foil cannot be assumed to be point detectors and spatial averaging effects should be taken into account. To quantitatively describe this effect [66], the transducer is considered as a planar piston. The displacement distribution is obtained from the Rayleigh integral solution [67], and all measured average values can be related to the peak pressure values [66].

F.2.3.1.4 Multipass effects in the foil

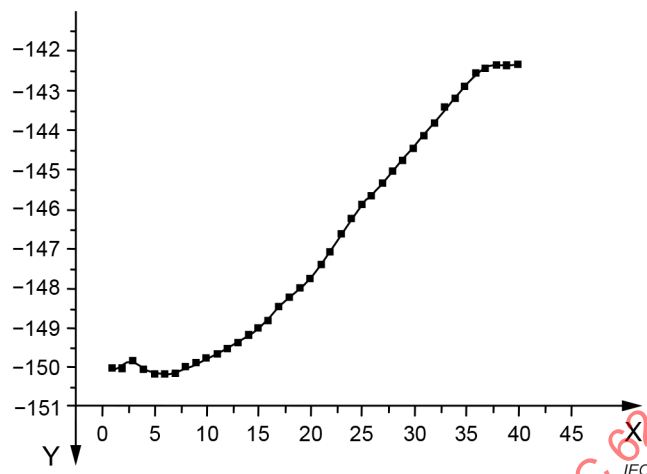
At the position of the ultrasound focus, the fluid is covered by a coated foil to improve the optical reflectivity. The incident sound field is partially reflected inside the foil and the metallic layer, and this multibeam interference influences the displacement of the foil. Since the phase front at the focus of a sound beam is nearly plane, a simple resonance model [66] using plane waves can be applied to quantitatively describe the systematic error due to this effect. It yields an acoustic transmission factor T for the displacement, which is inserted into Formula (F.2) and Formula (F.3).

F.2.3.1.5 Frequency response of the photodetector

In contrast to the frequency dependence of the amplifier gain $V(f)$ occurring in both measurements, the frequency response of the photodetector influences the **end-of-cable loaded sensitivity** M_L . A measurement of the transfer function using an optical mixing oscillator was carried out and all interferometer data were corrected accordingly.

F.2.3.1.6 Example results

As an example, Figure F.2 shows the **end-of-cable open-circuit sensitivity** level L_{M_c} of a coplanar membrane **hydrophone** with a layer thickness of 25 μm .



Key

X f (MHz)

Y L_{M_c} relative to 1 V/Pa in dB

Figure F.2 – End-of-cable open-circuit sensitivity level L_{M_c} of a coplanar membrane hydrophone

The **uncertainty** of this measurement was frequency dependent. Between 1 MHz and 5 MHz, 9,5 %, and in the range 5 MHz to 20 MHz, 8,0 % were estimated. These values increased to 10 % at 30 MHz and 12 % at 40 MHz. The **uncertainty** values given use a coverage factor of $k = 2$ and provide a confidence level of 95 %.

F.2.3.2 Implementation II

F.2.3.2.1 Measurement system and procedure

The measurement principle and set-up in general are similar to what is described for implementation I in F.2.3.1.1. However, instead of the homodyne stabilized Michelson interferometer a high-frequency (HF) heterodyne vibrometer is used to measure the displacement of the water surface (Figure F.3 a). Details of this approach can be found in the literature [68] and only a brief description is given here. The system extends the possibilities for primary calibration in comparison to implementation I. The heterodyne interferometer system applied is able to measure displacements of up to several hundred nanometres. This enables the use of short broadband ultrasonic pulses with high peak pressure values. The advantages of such pulses are the generation of higher harmonic signal components during propagation due to the nonlinear properties of water at high-pressure amplitudes. Secondly, all frequency components of the pulse have a fixed phase relation at the site of the measurement allowing the determination of the phase response of the **hydrophone** from the measurement. The excitation scheme enables the calibration of **hydrophones** up to high frequencies in a comparably short time, and the characterization in amplitude and phase at the same time, cf. Clause I.3. Finally, the integrated high-speed photodetector and vibrometer electronics used for the high-frequency carrier signal detection provide a flat response in the ultrasonic frequency range reducing the overall **uncertainties** [68],[69].

A focusing ultrasonic transducer with a nominal focal length of 50 mm is located inside a tank filled with deionized and degassed water. The transducer emits a short ultrasonic pulse with a duration of less than 1 μ s. The amplitude of the pulse is sufficient to excite nonlinear effects of water and this generates HF signal components during propagation [70]. The ultrasonic wave propagates upwards perpendicularly towards the water surface. The wave is reflected at the water surface and displaces it. The temporal displacement $\zeta(t)$ is measured by the vibrometer, which is located above the water surface. The laser beam of the vibrometer is perpendicularly incident to the water surface. The configuration avoids acousto-optic interaction. The displacement alters the optical light path and contributes to the optical phase of the laser beam $\varphi(t) = 4\pi\zeta(t)/\lambda_l$ with the optical **wavelength** λ_l . Inside the vibrometer this measurement beam interferes with a frequency-shifted reference beam. The shift between the angular frequency of both beams is Ω_c , in this case corresponding to a frequency of about 600 MHz, which is at the same time the carrier frequency of the high-frequency (HF) photodetector signal

$$U_{pd}(t) = A \sin(\omega_c t + \varphi_0 + \varphi(t)) \quad (F.4)$$

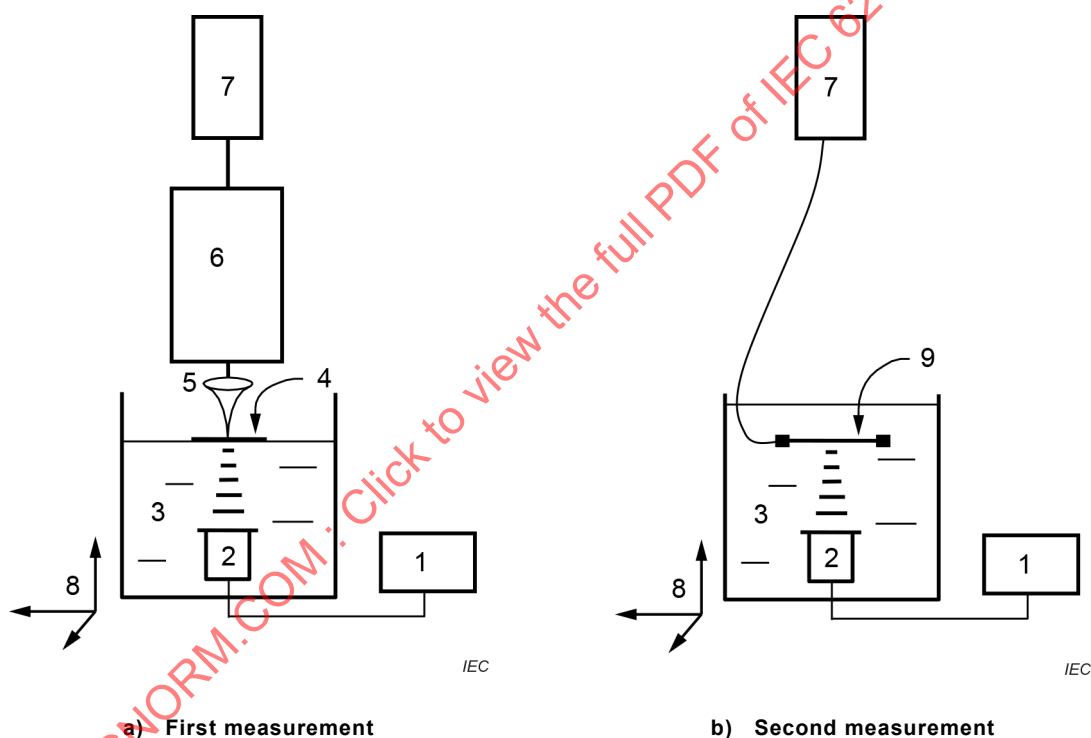
where A denotes the amplitude of the carrier signal and φ_0 the initial phase. After digitization in the connected oscilloscope, the signal is demodulated numerically using the arctan-method [71]. This step yields the optical phase and thereby the displacement $\zeta(t)$ as a low frequency (LF) signal in the megahertz range. A thin pellicle coated with aluminium is placed on the water surface. It acts as a mirror for the laser beam and increases the amount of the reflected light. The pellicle follows the movement of the water surface and the displacement transmission through the pellicle is accounted for by a frequency-dependent acoustic transmission factor $\underline{T}(f)$, cf. F.2.3.1.4. For low frequencies this factor has a value very close to 2 and decreases monotonically to 1,75 at 100 MHz. The factor 2 describes the fact that the ultrasonic wave is totally reflected at the free surface and that the displacement of the surface is twice as large as the particle displacement within the water. The corresponding acoustic pressure inside the water is calculated from the displacement by Formula (F.5):

$$\underline{p}(f) = \frac{2\pi i f \tilde{\zeta}(f) \rho c}{\underline{T}(f)} \quad (F.5)$$

$\tilde{\zeta}(f)$ is the Fourier transformation result of $\zeta(t)$ with frequency f . The factor $2\pi i f$ with the imaginary unit i , $i^2 = -1$, performs a time derivation of ζ executed in the frequency domain. It transfers the displacement into velocity v . Assuming a local plane wave, the particle velocity is linked to the acoustic pressure $p = v\rho c$ with the density of water ρ and the speed of sound c . This assumption is valid on the axis of symmetry of the acoustic field in the focal point of a focusing transducer and in the **far field** of a plane wave ultrasonic transducer. The lateral maximum position is found by searching for the maximum signal amplitude.

Within the second sub-measurement (Figure F.3 b) the sensitive element of the **hydrophone** is located at the same position of the acoustic field, where the pressure was investigated in the previous measurement with the vibrometer. The water level in the tank is increased to immerse the **hydrophone** entirely. Any signal reflected at the surface is excluded from the time window of signal acquisition. The time-dependent **hydrophone** voltage $U_H(t)$ is captured with an oscilloscope. Afterwards, the voltage is Fourier transformed into $\bar{U}_H(f)$. During evaluation correction for the electrical load at the **hydrophone** output as well as the gain of external amplifiers are accounted for. The distance is set by observing the propagation delay of the ultrasonic wave. The lateral maximum position is found by searching for the maximum signal amplitude in the same way as during the vibrometer measurement.

Using different electrical load conditions between the pulse generator and transducer and different voltage settings of the pulse generator allows slightly altering the pulse waveform and the fundamental and harmonic frequencies of the spectra, see I.3.1 [72]. Usually, five different pulse waveforms are used to cover the complete frequency range of the calibration with high signal strength, and the sensitivities obtained with each pair of measurements are averaged afterwards.



Key

- 1: pulse generator
- 2: focusing transducer
- 3: water
- 4: pellicle
- 5: objective lens
- 6: laser vibrometer
- 7: digital oscilloscope
- 8: xyz -positioning system for tank with transducer
- 9: **hydrophone**

Figure F.3 – Experimental set-up of the heterodyne vibrometer technique

F.2.3.2.2 Hydrophone sensitivity determination

The **hydrophone** sensitivity as complex-valued quantity in the frequency domain is calculated from the complex-valued acoustic pressure and the complex-valued **hydrophone** voltage spectra. The model formula to calculate the frequency-dependent **hydrophone** sensitivity $\underline{M}(f)$ is

$$\underline{M}(f) = \frac{\underline{U}_H(f) \underline{E}_{sp}(f)}{\underline{G}_{scope}(f)} \cdot \frac{\underline{T}(f) \underline{G}_{vib}(f) G_{opt}}{2\pi j f \underline{\xi}(f) \rho c} \cdot V_{rep} V_z \cdot \frac{\underline{Z}_H(f) + \underline{Z}_L(f)}{\underline{Z}_L(f)} \quad (F.6)$$

including the following complex-valued corrections:

$\underline{G}_{scope}(f)$	is the amplitude response of the oscilloscope which affects the measurement of the hydrophone voltage;
$\underline{E}_{sp}(f)$	is the spatial averaging correction factor due to the finite size of the hydrophone ; the related uncertainty includes the contribution caused by lateral misalignment of hydrophone and vibrometer [68],[70];
$\underline{T}(f)$	is the acoustic transmission factor of the pellicle; it is required to correct the displacement of the pellicle [66];
$\underline{G}_{vib}(f)$	is the frequency response of the vibrometer after demodulation; its origins are the frequency responses of the photodiode, transmission line and oscilloscope front end [68],[71],[73];
G_{opt}	is the influence of the microscope objective; focusing the light has the effect that the measured displacement amplitude is lower than the true amplitude [71],[74];
V_{rep}	is the repeatability of the acoustic field between the vibrometer and hydrophone measurement, mainly influenced by the voltage applied to the transducer; the expected value is 1 assuming that the acoustic field is not altered during the measurement;
V_z	is the change of the acoustic field caused by changing the distance; the expected value is 1 as the same distance is aimed at;
$\underline{Z}_L(f), \underline{Z}_H(f)$	are the complex-valued electrical load impedance on the hydrophone and the source impedance of the hydrophone , respectively.

F.2.3.2.3 Uncertainty determination

The **uncertainty** evaluation is performed in accordance with ISO/IEC Guide 98-3:2008/Suppl.2:2011 [75] to handle the complex quantities. The partial derivatives of the model formula, Formula (F.6), are evaluated for all n input quantities $\underline{U}(f)$, $\underline{E}_{sp}(f)$. The results as complex numbers form the covariance matrix and represent the **uncertainties**. All calculations are carried out with complex numbers comprising a real part and an imaginary part and in the final step the Gaussian representation is transformed into the polar representation with modulus and phase. The applied procedure is described in detail in ISO/IEC Guide 98-3:2008/Suppl.2:2011, Clause C.3 [75].

F.2.3.2.4 Acoustic pulse field

The sensitive area of a **hydrophone** has a diameter of several tenths of a millimetre. The ultrasonic pressure is, especially in the case of high frequencies, not evenly distributed across that area. The **hydrophone** voltage is proportional to the averaged sound pressure across the area. In contrast, the focused laser beam of the vibrometer has a diameter of less than 12 μm (full width at $1/e^2$). Thus, the laser spot is considered to be a point sensor measuring the peak acoustic pressure in the centre of the acoustic field. The averaging correction factor describes the ratio between the actual signal measured by the finite size **hydrophone** and the signal it would provide if the peak acoustic pressure measured by the vibrometer were distributed uniformly across the whole **hydrophone** sensitive area. To calculate the correction, the spatial distribution of the acoustic field is measured by the vibrometer [68]. This is done by radial scans originating at the position of maximum peak-to-peak pressure. After Fourier transformation, the results are expressed as frequency-dependent radial complex-valued profiles (Figure F.4). The profiles obtained are smoothed by fitting the data to complex functions $\underline{X}(r) = A(r)e^{iB(r)}$ at each frequency, where $A(r)$ and $B(r)$ are polynomial functions of sixth order. The calculation of the spatial averaging is then done by numerical integration of the polynomial function profiles. Figure F.5 shows the spatial averaging correction versus frequency for example **hydrophones** with **effective hydrophone sizes** between 50 μm and 250 μm (**hydrophone** effective diameter between 100 μm and 500 μm).

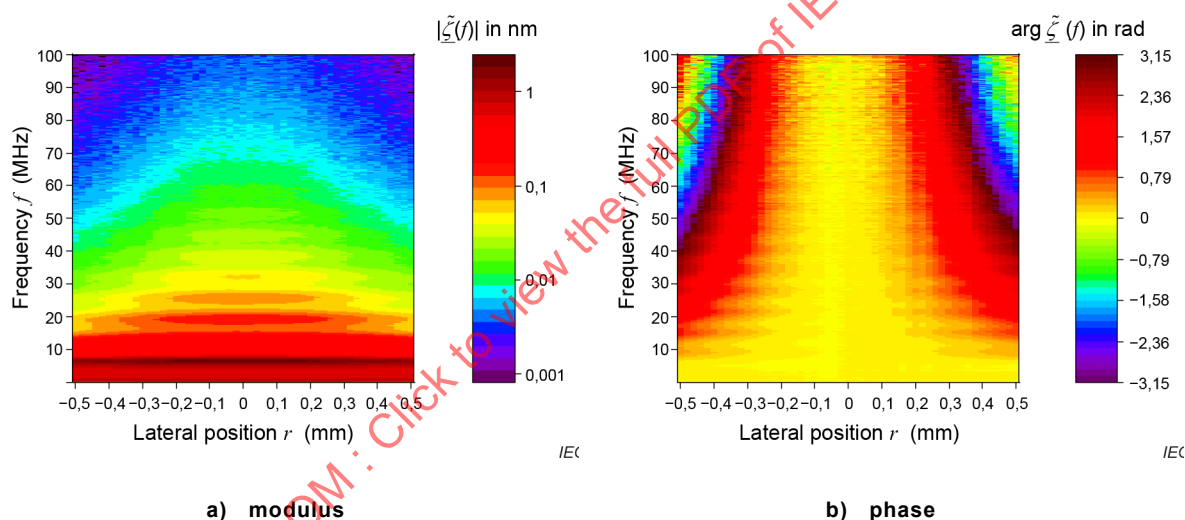
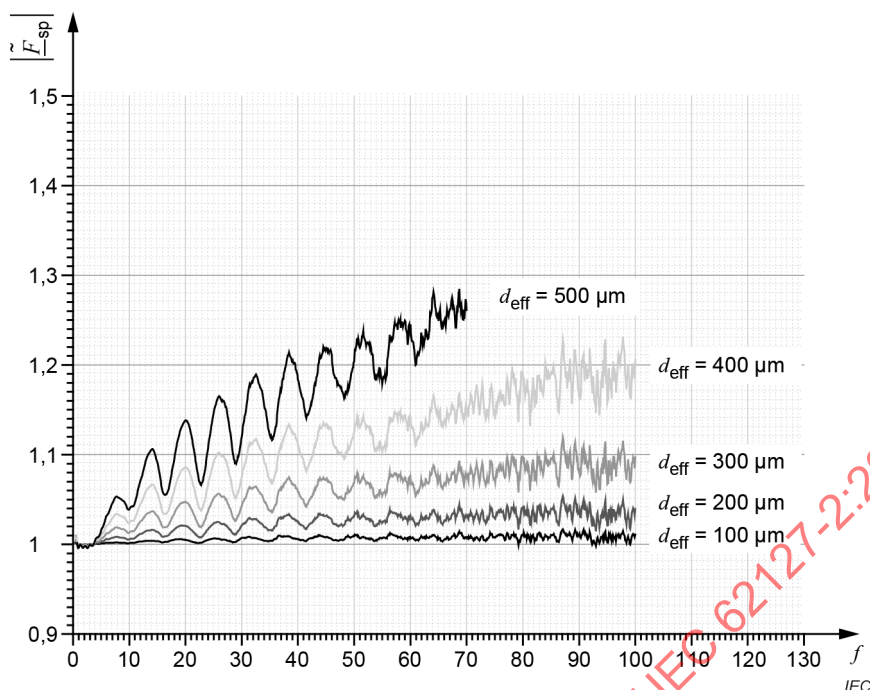


Figure F.4 – Measured frequency-dependent radial profiles of the acoustic pulse field



Key

f frequency in MHz

$|F_{sp}|$ modulus of spatial averaging correction

Figure F.5 – Experimentally determined spatial averaging correction versus frequency for hydrophones of different effective element diameter, d_{eff}

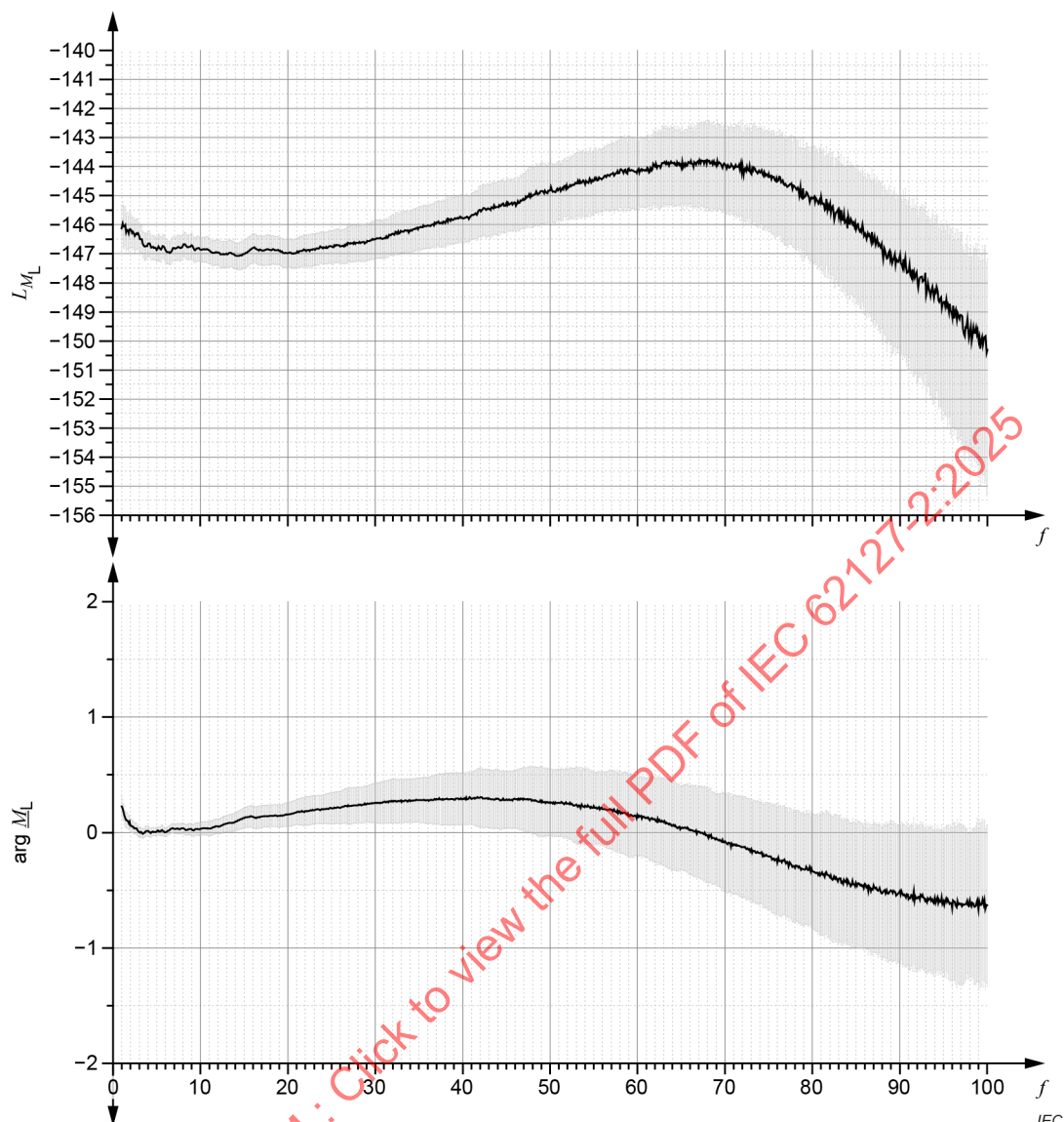
F.2.3.2.5 Example results

As an example, Figure F.6 shows the **end-of-cable loaded sensitivity level** L_{ML} of a coplanar membrane **hydrophone assembly** with a layer thickness of 12 μm and an **effective hydrophone size** of 130 μm (asymptotic high-frequency radius). The shading indicates the calibration **uncertainty** for a coverage factor of $k = 2$ providing a confidence level of 95 %.

F.2.3.2.6 Limitations

The method described has been validated through comparison with earlier established primary and secondary calibration techniques [69], and was connected through this laboratory internal study with the most recent international **hydrophone** calibration key comparison within the available frequency range [76].

For **hydrophones** with **effective hydrophone sizes** that are significantly larger than 0,25 mm (effective diameter larger than 0,5 mm), the used pulse field will lead to significantly increased correction factors [70] and larger **uncertainties** of the results. The application of planar laser-generated ultrasound sources as recently proposed [77] can be considered to possibly provide improvements in this regard. Another prerequisite for the applicability of the method is amplitude linearity of the **hydrophone** under test up to at least 5 MPa (see also Annex B). This is, however, provided by the vast majority of **hydrophone** systems used in medical ultrasonic exosimetry, anyway, and recommended in the **hydrophone** measurement standard IEC 62127-1.

**Key**

- f frequency in MHz
- L_{M_L} end-of-cable loaded sensitivity level relative to 1 V/Pa in dB
- $\arg \underline{M_L}$ phase of the end-of-cable loaded sensitivity in rad

Figure F.6 – End-of-cable loaded sensitivity level and sensitivity phase of a coplanar membrane hydrophone assembly at 50 Ω termination

F.2.3.3 Implementation III

F.2.3.3.1 Measurement system

The optical interferometric method, developed as a primary standard method of calibrating ultrasonic **hydrophones**, has been described in detail previously [78],[79],[80], and only a brief description is given here. The technique has been validated for frequencies above 500 kHz and up to 20 MHz by international intercomparisons between national standards laboratories [81],[76] and has become well-established as a primary standard. A good understanding has been developed of the sources of calibration **uncertainty**, with typical overall **uncertainties** for frequencies up to 20 MHz being 3 % or 4 % when expressed at a 95 % confidence level.

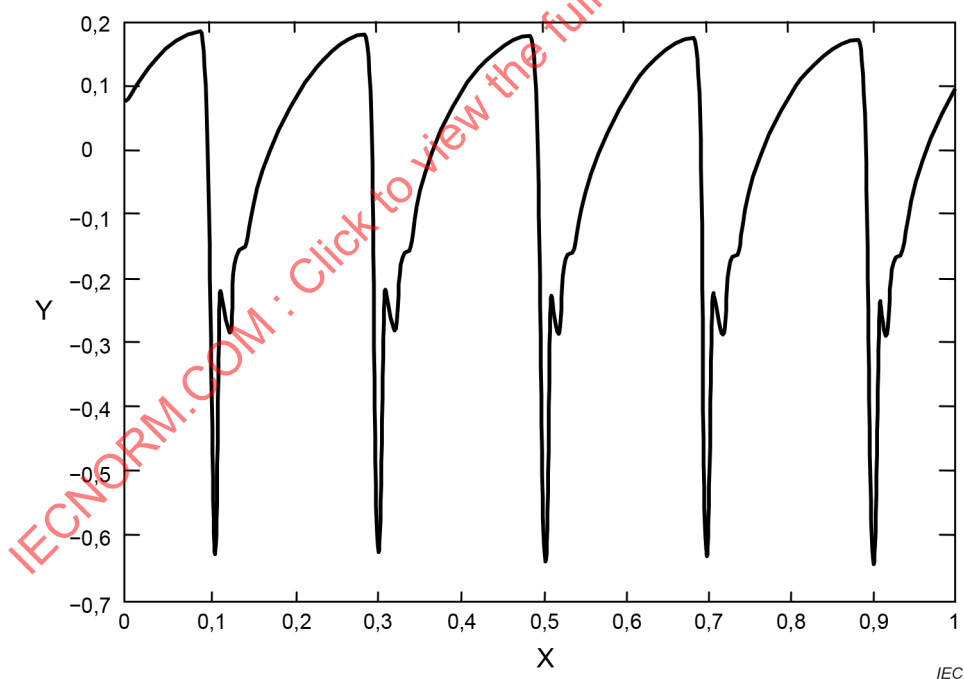
The pellicles used for the measurements are 3,5 μm and 5 μm thick polyethylene terephthalate film membranes coated with a 25 nm layer of gold. As the optical beam traverses the acoustic beam in this arrangement, the opportunity exists for the two beams to interact. The source of the interaction is the change in refractive index due to local changes in density of the medium in the compressional and rarefactional parts of the acoustic wave. This has implications for the acousto-optic interaction described in F.2.3.3.4.5.

F.2.3.3.2 The acoustic field

Calibrations are carried out using focusing transducers of nominal centre frequency 5 MHz. Two focal lengths are used in order that some of the systematic **uncertainties** associated with the calibration (acousto-optic, spatial averaging) can be investigated. The nominal focal positions of the transducers are 50 mm and 150 mm. They are driven using tone-bursts of sufficient amplitude to generate strongly nonlinearly distorted waveforms at the field position of interest (the focus). In this way, as demonstrated in Figure F.7 for a 0,5 mm, 9 μm coplanar membrane **hydrophone**, harmonics in the received **hydrophone** waveform can be detected up to 100 MHz.

NOTE The **hydrophone assembly** of this example is inverting, e.g. a positive output voltage refers to a rarefactional pressure and the sharp negative voltage peaks refer to compressional pressure parts of the waveform.

Note the close approximation to an ideal sawtooth, with the amplitude of successive harmonics showing a close to $1/n$ dependence in amplitude, where n is the harmonic number. While it is important to apply focusing transducers to generate sufficient acoustic pressures, their use has implications for the corrections, particularly spatial averaging, where the higher harmonics are of progressively narrower **beamwidth** (see F.2.3.3.4.4).

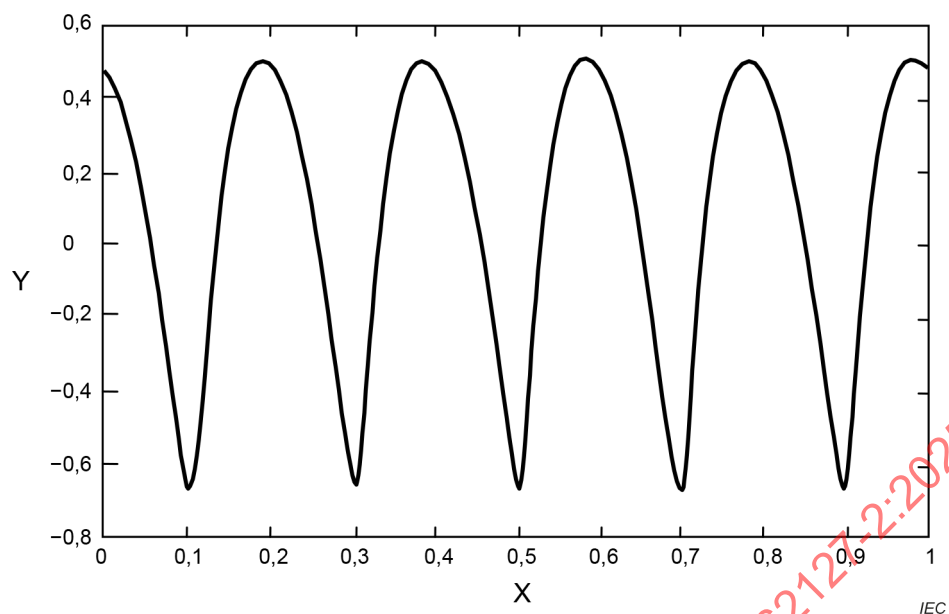


Key

X time (microseconds)

Y amplitude (volts)

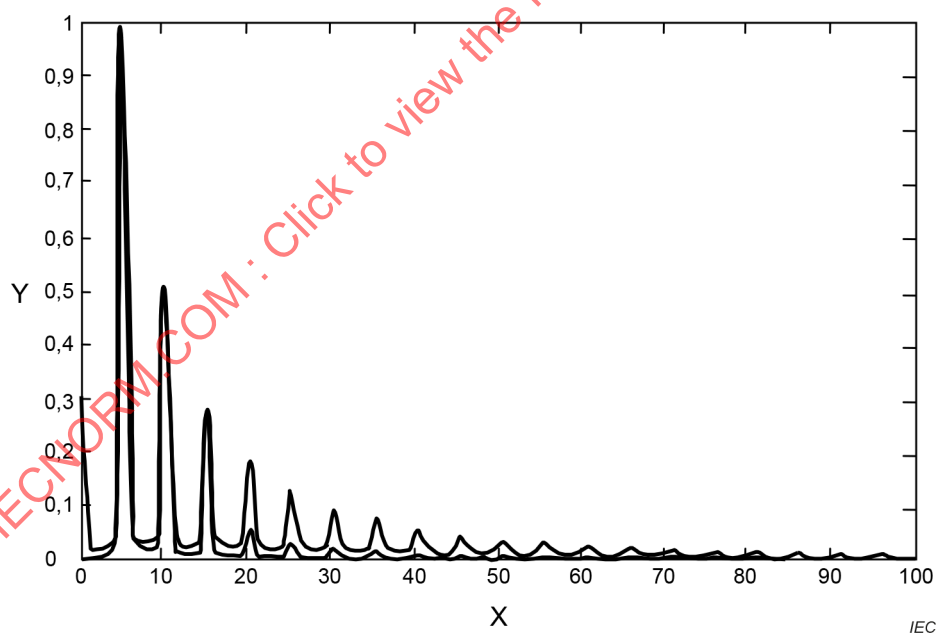
Figure F.7 – Hydrophone waveform generated by a 9 μm coplanar membrane hydrophone positioned at the focus of a 5 MHz transducer (focal length 51 mm)

**Key**

X time (microseconds)

Y amplitude (volts)

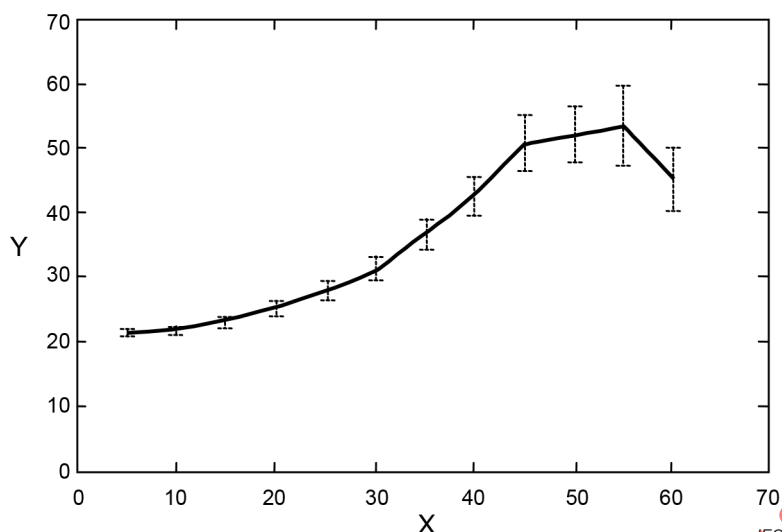
Figure F.8 – Interferometer displacement waveform generated with the pellicle positioned at the focus of the 5 MHz transducer (focal position 51 mm)

**Key**

X frequency (MHz)

Y normalized amplitude

Figure F.9 – Frequency spectrum of the displacement waveform (lower curve) and the differentiated displacement waveform (upper curve)



Key

X frequency (MHz)

Y sensitivity (nV/Pa)

Figure F.10 – Sensitivity of a 0,2 mm active element diameter of a 9 µm bilaminar membrane hydrophone determined at 5 MHz intervals over the frequency range 5 MHz to 60 MHz

F.2.3.3.3 Calibrations

Figure F.8 gives the displacement waveform generated by the pellicle positioned at the focus, 51 mm from the focusing 5 MHz transducer. Note the absence of any clear distortion of the waveform; this is confirmed by calculating the Fourier transform, shown in Figure F.9, the lower of the two curves (the displacement waveform). Differentiating the displacement spectrum yields the pressure spectrum and this is also shown in Figure F.9 (the differentiated displacement waveform), where frequency components up to 60 MHz can now be readily seen. By comparing the output of the **hydrophone** placed at the same position in the field with the differentiated pellicle spectrum, the **hydrophone** can be calibrated over the frequency range of interest. Figure F.10 shows the calibration results derived for a 9 µm bilaminar membrane **hydrophone** of active element diameter 0,2 mm. The device has a theoretical resonance in its frequency response at 55 MHz which can clearly be seen in the calibration results. The **uncertainties** given on the plot are random **uncertainties** and degrade above about 40 MHz due to the diminished signal-to-noise ratio of the pellicle signal content at these elevated frequencies.

F.2.3.3.4 Calibration corrections and sources of measurement uncertainty

F.2.3.3.4.1 General

In F.2.3.3.4, the most significant sources of measurement **uncertainty** associated with the calibration will be briefly outlined.

F.2.3.3.4.2 Interferometer frequency response

The frequency response of the interferometer is essentially that of the avalanche photodiodes and amplifier. This has been measured in the range 1 kHz to 20 MHz in the past, using a frequency response calibrator developed specifically for the purpose [82]. Extension of the working frequency range of the interferometer up to 60 MHz required modifications to be made to the frequency calibrator. Using the modified frequency calibrator, the frequency response of the interferometer was determined up to 100 MHz. **Uncertainties** in the frequency response calibration varied from 3,5 % (20 MHz) to 4,3 % (40 MHz).

F.2.3.3.4.3 Pellicle transmission coefficient

The calibration results must be corrected for the transmission properties of pellicles. Two approaches to deriving this correction are possible, one theoretical and the other experimental. By the use of simple acoustic theory for propagation of plane waves through layers of dissimilar material, a model was developed to calculate the frequency-dependent transmission coefficient of the pellicles. This assumes that attenuation of the acoustic beam in the 25 nm-thick gold layer is negligible. Further, an experimental method of determining the transmission coefficient over the range 2 MHz to 60 MHz was devised, based on a substitution method using a nonlinearly distorted field generated by a 2 MHz fundamental transducer. The pellicle is positioned between the transducer and a **hydrophone** (with the pellicle being placed very close to the **hydrophone**), and the transmission coefficient of the pellicle determined. Through a combination of theory and measurement, a frequency-dependent correction is applied, whose **uncertainty** varies from 1 % at 5 MHz to 2 % at 40 MHz.

F.2.3.3.4.4 Spatial averaging correction

The narrow **beamwidths** of the harmonics generated by the 5 MHz focusing transducers make it necessary to correct for the spatial averaging of the pressure distribution over the active element of the **hydrophone**. An experimental investigation of spatial averaging was undertaken by carrying out beam plots at the focus of the transducer, using the 0,2 mm active element diameter, 9 µm bilaminar membrane **hydrophone**, Fourier transforms of the waveforms being carried out so that the harmonic **beamwidths** can be derived. It is assumed that no spatial averaging corrections are required for the laser spot, which is 0,1 mm in diameter. **Uncertainties** in the spatial averaging corrections derived using this assessment varied from 1 % at 5 MHz to 6 % at 40 MHz.

F.2.3.3.4.5 Acousto-optic interaction

Since the optical beam traverses the acoustic beam in the experimental arrangement used, the opportunity exists for the two beams to interact. This means that the displacement measured by the interferometer is not the true displacement of the pellicle membrane, since the optical path length will change due to both the pellicle movement and the variation in the refractive index along the path of the laser beam. To account for the effect, a relatively large correction should be applied to the measured displacement, which is mainly accomplished by an effective refractive index for water. The accuracy of the correction has been validated for the linear plane wave regime used for low frequency calibrations [78], but the high amplitude nonlinear focused fields used in this work lead to an increase in the **uncertainty** from the refractive index. The acousto-optic effect is the subject of a continuing assessment but work completed to date indicates the **uncertainty** contribution made by the variation in the refractive index is no more than 1 % over the frequency range of interest. The non-plane wave contribution to the effect is estimated to vary from 0,5 % at 5 MHz to 3 % at 40 MHz.

F.2.3.3.4.6 Overall measurement uncertainty

An assessment of the **uncertainty** of the optical interferometer method of high-frequency calibration has been published [83] with estimates of the expanded measurement **uncertainties** varying from 7 % at 20 MHz to 11 % at 40 MHz.

Annex G (informative)

Waveform concepts

G.1 Overview

Hydrophone calibration relies on the application of a specified and stable ultrasonic field. The characteristics of this applied field can vary, depending on the electrical waveform applied to the transducer, details of the transducer (flat, planar or focusing) and the position in the ultrasonic pressure field chosen from which to undertake the calibration. Various concepts are applicable; these are described in detail in Clause G.1 to Clause G.5 and summarized in Table G.1.

Table G.1 – Temporal waveform and hydrophone position concepts described in Annex G

Temporal waveform concepts		Hydrophone position concepts	
a	Narrow-band tone-burst	A	Near field position
b	Broadband waveform resulting from narrow-band tone-burst utilizing nonlinear propagation	B	Far field position
c	Broadband pulse	C	Far field position with long propagation path to achieve nonlinear distortion
d	Continuous wave frequency sweep with time delay spectrometry	D	Geometric spherical focus position with focusing source transducer (linear propagation)
e	Continuous wave frequency sweep with time gating frequency analysis TGFA	E	Geometric spherical focus position with focusing source transducer (nonlinear propagation)

Additionally, Clause G.5 describes special considerations when calibrations are carried out close to the face of a planar transducer (**hydrophone** position concept A, described in G.4.1).

G.2 Temporal waveform, frequency concepts and hydrophone positioning for comparison calibrations of hydrophones

All results obtained in accordance with Clause G.2 refer to a certain ultrasonic frequency. They are considered as a function of frequency and can basically be understood as amplitudes in a frequency spectrum.

The concepts that relate to the temporal waveform and frequency identification are:

- a) narrow-band tone-burst;
- b) broadband waveform resulting from a narrow-band tone-burst after nonlinear propagation;
- c) broadband pulse;
- d) continuous wave frequency sweep with time delay spectrometry (TDS) (see Annex H);
- e) continuous wave frequency sweep with TGFA [58].

The concepts regarding the **hydrophone** position in the ultrasonic field are:

- A. **near field** position;
- B. **far field** position;
- C. **far field** position with special reference to a long propagation path in order to achieve nonlinear distortion (in connection with temporal waveform concept b).
- D. geometric spherical focus position with focusing source transducer (low amplitude or linear excitation);
- E. geometric spherical focus position with focusing source transducer (high amplitude excitation).

Assuming a plane-circular transducer, it can generally be said that the field is composed of a plane direct wave and non-plane edge wave. In accordance with the **hydrophone** position concept A, the **hydrophone** is placed fairly close to the transducer, where, as they have different propagation path lengths, the two wave components can be separated from each other. By choosing an appropriate time gate, the direct, plane ultrasonic pulse can be picked out. In accordance with the **hydrophone** position concepts B and C, on the other hand, the **hydrophone** is placed on the **beam axis** in the **far field**. In this region, there is only a relatively small path length difference between the two wave components, so they inevitably interfere with each other, but the resulting field character is almost plane, the main restriction being that of a limited diameter of the central lobe of the field.

In **hydrophone** position concepts D or E, the source transducer is focusing so that the beam has the same shape at the geometric focus as that obtained in the **far field** of a non-focusing transducer. For **hydrophone** position concept D, the advantage of using a focusing transducer as a source is that conditions similar to **hydrophone** position concept B are obtained in a shorter path length under linear excitation conditions, thereby reducing attenuation effects. For **hydrophone** position concept E, the field of a focusing transducer at its geometric focus is used to achieve nonlinear distortion through high amplitude voltage excitation. The advantages of **hydrophone** position concept E are that the attenuation is reduced by the shorter path length for both the fundamental and higher harmonic components of the pressure waveform and the nonlinear distortion is obtained by the increased pressure amplitude caused by the focal gain of the transducer.

NOTE Certain combinations of the temporal waveform concepts and the **hydrophone** position concepts are preferred in the literature (although up to now mostly in the frequency range up to 15 MHz or even lower). These are the combinations aB [84], aD [67], bC [85],[86], cA [87], dB [88],[89],[39] and cE [63],[68],[72]. Other combinations are also possible.

G.3 Temporal waveform and frequency coverage concepts

G.3.1 Using a narrow-band tone-burst (concept a)

Here, a rectangular, sinusoidal tone-burst of fixed frequency f and burst duration τ is applied. The **hydrophone** output voltage does not usually show a clear rectangular burst, but rather a signal with initial and final transients and ideally with a central part of constant amplitude. The burst should be sufficiently long to achieve such a constant **hydrophone** signal amplitude. The constant signal amplitude is measured, for example by means of a calibrated oscilloscope. The result obtained refers to the particular frequency chosen.

This concept is characterized by the following features.

- It is a single-frequency method. If the result is desired for several frequencies, the measurement should be repeated at these frequencies. As this involves changing transducers and realigning, this is time-consuming.
- The frequency range of the source transducer should cover the desired frequency band, therefore, in practice, it should be a damped, broadband transducer well-suited to the frequency range in question.
- The transducer should produce ultrasonic wave amplitudes high enough to be well above the **hydrophone** noise, taking into account the ultrasonic attenuation along the propagation path.
- If the **hydrophone** output voltage is measured with a broadband instrument, the harmonic content of the signal should be checked and should be lower than –30 dB in comparison with the fundamental frequency.

NOTE If the harmonic content of the signal is greater than –30 dB, band-pass filtering of the signal at the fundamental frequency, or a spectrum analysis of the signal, can be used to eliminate the effect of the content of the second and higher harmonics, by solely analysing the fundamental component.

G.3.2 Using a broadband waveform resulting from a narrow-band tone-burst after nonlinear propagation (concept b)

A sinusoidal tone-burst of high voltage is applied to the transducer. The ultrasonic signal is propagated over a long distance until a highly asymmetric time waveform is measured by the **hydrophone** at the **hydrophone** positions described by either concept C or concept E. This distorted waveform is characterized by peaked compressional half-cycles and shallow rarefactional half-cycles. The harmonic content of the spectrum contains equidistant frequencies separated by the fundamental frequency value and with amplitudes that roughly decrease as $1/n$ if n is the harmonic number. The signal received is either fed to a spectrum analyser or into a fast Fourier transform (FFT) calculation stage and the measurement result for a number of discrete frequencies is obtained.

The ultrasonic source itself can be a narrow-band, resonant transducer with a frequency well below the range of interest. However, its frequency should not be too low, as harmonic amplitudes that are high enough should be produced whose frequencies should not be too far removed from the fundamental frequency. For the frequency range of this document and in view of the requirements for determining the frequency-dependent sensitivity as required in IEC 62127-3, the fundamental frequency of this kind of transducer should be in the range of roughly 1 MHz. The transducer should be able to produce pressure amplitudes in the megapascal range, but without producing too much heat, as this would disturb the temperature stability of the measurement tank (see 6.2) and can also lead to an instability of the transducer radiation conductance. These problems can be handled by intermittent operation using a suitable duty factor.

G.3.3 Using a broadband pulse (concept c)

A short broadband pulse of duration τ is produced by the source transducer. The **hydrophone** output signal is again fed to a spectrum analyser. In this case, the frequency resolution of the spectrum amplitude is equal to the reciprocal of the time interval over which the broadband pulse is measured, and the frequency range covered by the spectrum depends on the pulse produced.

The source transducer can be either a damped, resonant transducer with the main part of the pulse frequency spectrum being around its resonance frequency as determined chiefly by its thickness, which should be low for the frequencies of this document, or it can be a thick transducer excited by a short current spike as obtained by short-circuiting a high voltage. The main problem in reaching the frequency range of this document in the latter case is achieving a rapid switching of high voltages and currents. The thickness of the transducer in the latter case determines the time delay of the arrival of the mechanical pulse radiated at the rear surface of the transducer and disturbs the measurement if this delay is too short.

Damped focusing transducers excited by short current spikes can provide broad frequency spectra when exploiting the nonlinear propagation in water [72],[28],[68],[69],[70],[90]. This excitation concept is applied in F.2.3.2 and Clause I.3.

G.3.4 Using a continuous wave frequency sweep with time delay spectrometry (concept d)

A continuous wave signal is used with a linear frequency sweep over the frequency range of interest and at a constant sweep rate. The **hydrophone** output signal is passed through a narrow-band tracking filter, which is swept synchronously, but with a certain frequency offset in relation to the generator frequency. This frequency offset is adjusted to the time-of-flight corresponding to the propagation time of the direct ultrasonic signal from the transducer to the **hydrophone**, the time-of-flight being determined by the transducer-to-**hydrophone** distance and the speed of sound, which is a function of the water temperature. This technique suppresses the potential influence of reflected signals, which are, strictly speaking, all those signals that have a propagation time differing substantially from that of the direct signal.

The main component of the electronic equipment in this case is a special kind of spectrum analyser able to perform all the relevant operations mentioned. The **hydrophone** output voltage is obtained as a continuous function of frequency. The electronic equipment, particularly the spectrum analyser, should operate in the frequency range of interest.

The frequency and amplitude requirements with respect to the transducer are the same as those of G.3.1.

G.3.5 Continuous wave frequency sweep with TGFA (concept e)

Details of the time gating frequency analysis (TGFA) technique can be found in [58].

G.4 Hydrophone position concepts

G.4.1 Near-field hydrophone position (concept A)

The **hydrophone** is positioned fairly close to the transducer on the **beam axis**. The direct, plane wave burst or pulse is picked out from the **hydrophone** output signal by adjusting a time gate.

The suitability of the transducer should be checked by observing the **hydrophone** output signal when the **hydrophone** is moved laterally. Ideally, the **hydrophone** output signal is independent of the lateral position (in the usable paraxial region, see G.5.2), if all parts of the transducer surface vibrate with uniform amplitude and phase. Issues related to calibrations close to the face of a transducer are covered in Clause G.5.

The geometrical region usable for this type of measurement can be assessed as in G.4.2 if τ is the burst or **pulse duration**.

G.4.2 Far field hydrophone position (concept B)

NOTE This applies only in connection with temporal waveform concepts a, c, d and e. For the **hydrophone** position type in connection with temporal waveform concept b, see G.4.3.

The **hydrophone** is positioned on the **beam axis** in the **far field** of the transducer. The **far field** begins at the location of the last axial maximum, which should be determined for the highest frequency in question. This distance is regarded as the minimum distance for the **hydrophone** position in this case.

For a theoretical plane-circular piston source, the last axial maximum is at a distance $z = a_t^2 f / c$. This distance is proportional to the frequency, and so in the frequency range of this document, appreciable distance values can result, depending on the transducer radius. However, the propagation path length should not generally exceed the value of a few decimetres in order to avoid as far as possible the consequences of ultrasonic attenuation, and so source transducers with a sufficiently small diameter should be chosen in this case.

G.4.3 Far field hydrophone position with special reference to a long propagation path in order to achieve nonlinear distortion (concept C)

In connection with temporal waveform concept b, given in G.3.2, the propagation path should be sufficiently long to achieve both significant nonlinear distortion of the waveform and to ensure that the acoustic pressure distribution is sufficiently broad so that spatial averaging effects are maintained below a specified level (see Annex J). This can be achieved using relatively large diameter plane-piston transducers whose near-field distance $a_t^2 f / c$ are in the range 200 mm to 400 mm [85].

In any implementation of this method, the frequency content of the axial nonlinear field of the transducer should be investigated to establish the optimum comparison position or positions, which should maximize the signal-to-noise ratio for frequencies up to the upper frequency limit of the **hydrophone's** frequency band f_u .

G.4.4 Geometric spherical focus position with focusing source transducer (low voltage or linear excitation) (concept D)

NOTE This applies only in connection with temporal waveform concepts a, c, d and e. For the **hydrophone** position type in connection with temporal waveform concept b, see G.4.3.

The **hydrophone** is positioned on the **beam axis** at the geometric spherical focus of the focusing source transducer [91]. If the geometric focal length of the transducer F is not known, it can be determined from z_{pf} , the distance of the pressure focus (which is the position of the maximum pulse-pressure-squared integral along the **beam axis**) from the focusing transducer, and Formula (G.1):

$$F = \left(\frac{1}{z_{pf}} - \frac{c}{f a_t^2} \right)^{-1} \quad (\text{G.1})$$

For linear propagation conditions, the local distortion parameter, σ_q (see IEC 62127-1), for focusing transducers should be less than 0,5.

G.4.5 Geometric spherical focus position with focusing source transducer and high voltage excitation in order to achieve nonlinear distortion (concept E)

The **hydrophone** is positioned on the **beam axis** at the geometric spherical focus of the focusing source transducer. If the geometric focal length of the transducer F is not known, it can be determined from the location of the pressure focus under linear excitation conditions as described in G.4.4.

G.5 Special considerations for calibrations close to the face of a transducer

G.5.1 General requirement

The axial distance between **hydrophone** and ultrasonic transducer surface z should be

$$z \geq \frac{c\tau}{2} \quad (\text{G.2})$$

so that any pulse reflected from the **hydrophone** to the source and back to the **hydrophone** will not interfere with the end of the pulse initially incident on the **hydrophone**.

G.5.2 Influence of edge waves

A plane-circular source transducer of radius a_t and a field point P at some axial distance from the transducer z and lateral distance a_p from the **beam axis** are considered (see Figure G.1). The path length of the direct plane wave is z . The shortest propagation path length of the edge wave is $\sqrt{z^2 + (a_t - a_p)^2}$, referred to as r in Figure G.1. The fundamental requirement is that τ should not be greater than the time-of-flight difference between the edge wave and the plane wave. This leads to the inequality

$$\tau \leq \tau_{\max E} = \frac{\sqrt{z^2 + (a_t - a_p)^2} - z}{c} \quad (\text{G.3})$$

which can be modified to

$$a_p \leq a_{p\max E} = a_t - \sqrt{(c\tau)^2 + 2c\tau z} \quad (\text{G.4})$$

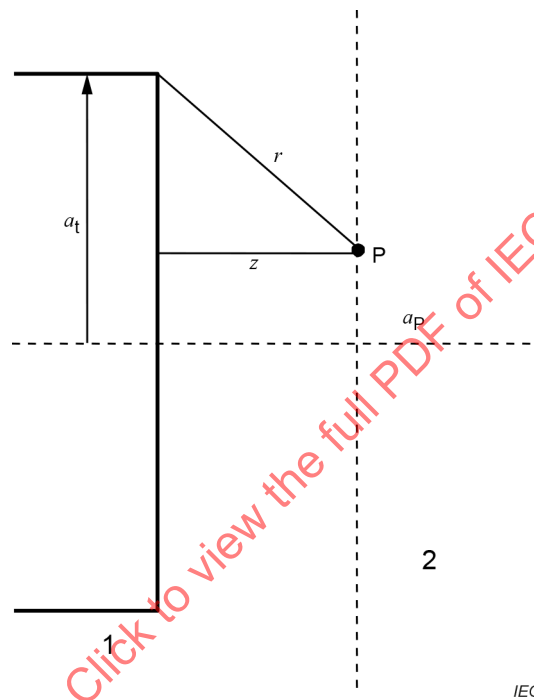
this being the inequality defining the paraxial region that can be used.

NOTE Depending on the actual set of parameter values, it can occur that the inequality as outlined in Formula (G.4) has no solution (which means, formally, that it has a negative solution), in which case this type of measurement is not possible. A remedy would be to either reduce the burst or **pulse duration** τ or the **hydrophone** distance z or both. The condition for the inequality as outlined in Formula (G.4) having a positive solution, which means that this type of measurement is possible, can be formulated as in Formula (G.5):

$$z < z_1 = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{a_t}{c\tau} \right)^2 - 1 \right\} c\tau \quad (\text{G.5})$$

G.5.3 Potential influence of head waves

The plane wave field near the transducer can also be disturbed by waves of another type. These are head waves caused by radial modes that can exist in the transducer during pulse excitation. If a radial wave in the transducer starts at the transducer rim and moves inside at velocity v_t which is assumed to be larger than the speed of sound c in the sound-propagating fluid, a field of head waves is radiated into the fluid and can arrive at the **hydrophone** and produce a disturbing output signal, depending on the **hydrophone's** position, as described, for example in [92] and [93]. The details depend largely on v_t . As there is usually no *a priori* knowledge about this quantity, no general recommendations can be given here. The practical details should be studied individually and experimentally [92]. The treatment below provides assessment formulae analogous to Formula (G.4) and Formula (G.4), which are helpful if v_t is known.



Key

- 1 transducer
- 2 **hydrophone** measurement plane
- a_t radius of plane-circular transducer
- z axial distance from the transducer, path length of the direct plane wave
- P field point
- a_p lateral distance from the **beam axis**
- r' propagation path length of the edge wave

Figure G.1 – Coordinates of a field point P in the near field of a plane-circular source transducer of radius a_t

G.5.4 Treatment of head waves close to the transducer

Consideration is given to a plane-circular source transducer of radius a_t in accordance with Figure G.1. Consider the conical region (symmetrical with respect to the **beam axis**) whose base is the circular transducer surface and whose apex is the axial point

$$z = z_2 = a_t \sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1} \quad (\text{G.6})$$

where v_t is the speed of a radial wave in a transducer plate.

The generating line for this right circular cone is:

$$a_p = a_t - \frac{z}{\sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1}} \quad (\text{G.7})$$

For points (z, a_p) in this region, two head waves will be present, one originating at the nearest point on the source perimeter and one at the furthest [92],[93]. On axis, these head waves coincide. At all points in this conical region, the nearest head wave arrives sooner than the edge wave, so its influence on the usable geometrical region should be considered. Unlike edge waves, head waves are not present at all points in the field. Outside the conical region, head waves either do not exist or arrive later than the edge wave and therefore need not be considered for the purposes of this document.

Within the conical region defined above, the fundamental requirement when considering head waves is the same as for edge waves, i.e. the burst or pulse duration τ should be not greater than the time-of-flight difference between the nearest head wave and plane wave components. The time of arrival of the nearest head wave t_H is:

$$t_H = \frac{a_t - a_p + z \sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1}}{v_t} \quad (\text{G.8})$$

Therefore, in analogy to Formula (G.3) and Formula (G.4), the condition is:

$$\tau \leq \tau_{\max H} = \frac{a_t - a_p - z \left\{ \frac{v_t}{c} - \sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1} \right\}}{v_t} \quad (\text{G.9})$$

from which

$$a_p \leq a_{p\max H} = a_t - v_t \tau - z \left\{ \frac{v_t}{c} - \sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1} \right\} \quad (\text{G.10})$$

The inequality as outlined in Formula (G.10) has positive solutions if

$$z < z_3 = \frac{a_t - v_t \tau}{\frac{v_t}{c} - \sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1}} \quad (\text{G.11})$$

G.5.5 Statements on the usable paraxial plane wave region in the case of a near-field hydrophone position, considering both edge wave and head wave contributions

Assume that a **hydrophone** is positioned at an axial distance z from a plane-circular source transducer of radius a_t (in accordance with Figure G.1) emitting a burst or pulse of duration τ . The time-of-flight criteria lead to the following statements, depending on the actual value of z in relation to four reference values, the first three of which have been given as z_1 , z_2 and z_3 in Formula (G.5), Formula (G.6) and Formula (G.11), and the fourth of which is defined by

$$z_4 = \frac{\sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1}}{\frac{v_t}{c} - \sqrt{\left(\frac{v_t}{c}\right)^2 - 1}} c\tau \quad (\text{G.12})$$

A complete set of different cases is given in the following.

- If $z \geq z_1$, the type of measurement considered is not possible due to a violation of the edge wave time-of-flight condition.
- If $z < z_1$ and $z \geq z_2$, the measurement is possible and the usable paraxial region is given by inequality as outlined in Formula (G.4).
- If $z < z_1$ and $z < z_2$ and $z \geq z_3$, the measurement is not possible due to a violation of the head wave time-of-flight condition.
- If $z < z_1$ and $z < z_2$ and $z < z_3$ and $z \geq z_4$, the measurement is possible and the usable paraxial region is given by inequality as outlined in Formula (G.4).
- If $z < z_1$ and $z < z_2$ and $z < z_3$ and $z < z_4$, the measurement is possible and the usable paraxial region is given by inequality as outlined in Formula (G.10).

Note that the **hydrophone's** whole sensitive area should be in the usable paraxial region so that R includes both the **hydrophone** radius plus, possibly, the lateral distance of the **hydrophone** centre from the **beam axis**.

Note also that all the statements above are subject to the general requirement of inequality as outlined in Formula (G.2).

Annex H (informative)

Time delay spectrometry – Requirements and a brief review of the technique

H.1 General

Time delay spectrometry (TDS) was originally proposed [94] for analysis of loudspeaker behavior in acoustically reflective environments. Later, it was suggested for calibration of **hydrophones** in the megahertz frequency range [88]. A comprehensive analysis of the TDS technique [17] reviews and examines in depth all space and instrumentation requirements needed for practical implementation of the TDS technique. A combination of TDS and reciprocity [89] has been used for absolute calibration of **hydrophones** and several experimental data are presented in [95]. The figure of merit in terms of frequency resolution has also been considered [39].

In this Annex H, the most important requirements of the TDS technique and its relevant parameters are briefly reviewed.

H.2 Calibration and performance evaluation of ultrasonic hydrophones using time delay spectrometry

H.2.1 Ultrasonic field parameter measured

The primary parameter to be measured when using the TDS technique is acoustic pressure. The pressure amplitude is recorded concurrently with the electrical voltage produced at the **hydrophone** terminals. The ratio of the voltage and its corresponding pressure yields the **end-of-cable loaded sensitivity** as a continuous function of frequency.

H.2.2 Ultrasonic frequency range over which the technique is applicable

The technique is used in the audible acoustics range from about 20 Hz and in biomedical ultrasonics from 1 MHz to 40 MHz. The technique has also been successfully implemented from 100 kHz to 1 MHz.

Limitations are:

- a) the frequency range of the measurement equipment available;
- b) in the case of a substitution calibration, the availability of calibrated reference **hydrophones** in the frequency range of interest.

NOTE Modifications of the TDS enable the calibration bandwidth to be extended to at least 60 MHz [58],[96].

H.2.3 Ultrasonic field configuration for which the technique is applicable

Plane waves (continuous wave and swept).

H.2.4 Spatial resolution

The output signal represents the frequency spectrum of the measured temporal signal. The range resolution depends on the ratio of the filter bandwidth to the sweep rate used. **Uncertainty** in the frequency resolution of the performed measurement can, in general, be expressed as

$$f = 1/t_{\text{TDS}} \quad (\text{H.1})$$

where

f is the frequency in hertz; and

t_{TDS} is the time available for a **free field** measurement in TDS, in seconds.

Both frequency response and directivity patterns can be readily obtained by using the TDS technique; see examples in [17],[29],[88],[89],[29],[95],[96],[97].

H.2.5 Sensitivity of the technique

The sensitivity of the technique depends on the input signal available from the **hydrophone** being tested. At acoustic pressure amplitudes as low as 1 kPa, a typical signal-to-noise ratio of approximately 50 dB can be achieved. The maximum achievable signal-to-noise ratio is on the order of 75 dB. Typically, changes of about 0,2 dB in the **end-of-cable loaded sensitivity** can be detected.

H.2.6 Range over which the sensitivity is measured

End-of-cable loaded sensitivity levels or **end-of-cable open-circuit sensitivity** levels down to approximately –300 dB relative to 1 V/μPa, (1×10^{-9} V Pa⁻¹) can be measured readily.

H.2.7 Reproducibility

Typical reproducibility is in the range of less than ±5 % (in the range 0,1 MHz to 10 MHz) for sensitivities greater than 3nV/Pa. Achievable reproducibility is approximately 2 %.

H.2.8 Impulse response

Impulse response can be obtained from a Fourier transform of the frequency response if the phase of the TDS signal is recorded. The resolution of the impulse response is commensurate with the frequency range recorded [98].

H.2.9 Procedure for performing measurements

Consult [17],[39],[88],[89],[95],[96],[97] for a typical measurement arrangement. The procedures are briefly given in Clauses H.3 and H.4.

H.3 Measurement procedure for sensitivity intercomparison

- a) Position and align transducer and receiver being a previously calibrated **hydrophone** [32],[98],[99] in a degassed, distilled water bath, controlled to $\pm 0,5$ °C.
- b) Measure logarithmic spectrum in the selected frequency range.
- c) Store measured spectrum in memory.
- d) Replace known reference ultrasonic **hydrophone** with a **hydrophone** to be calibrated.
- e) Repeat steps a), b) and c).

NOTE Positioning can be done as follows: verify that the **hydrophone** to be calibrated is in the same field position as the reference **hydrophone** by either a) pulsing the transducer (transmitter) and adjusting the axial distance so that the pulse propagation delay is the same for both **hydrophones**, and then moving the **hydrophone** to be calibrated laterally to maximize the signal; or b) with the TDS time delay set the same as for the reference **hydrophone**, positioning the **hydrophone** to be calibrated so that its signal is maximized.

- f) Plot the difference of both logarithmic spectra. If the reference **hydrophone** has a flat frequency response, the difference represents the frequency response of the **hydrophone** being calibrated. See [17],[39],[88],[89],[94],[95] for details.

The TDS technique can be used both in performing sensitivity intercomparisons and absolute reciprocity calibration. See [39],[89] for details. However, for the sensitivity intercomparison, a reference **hydrophone** having a known frequency response as a continuous function of frequency is required.

H.4 Measurement procedure (reciprocity calibration)

Reciprocity calibration comprises a fairly complex measurement set-up and special equipment. More specifically, a wideband bridge circuit, to decouple the transmit and receive signals, and wideband transducer dummy load are used. Instead of a dummy load, two identical transmitters can be used. See [39],[89] for details. The measurement **uncertainty** obtained with the combined reciprocity calibration measurement procedure and TDS technique has been reported to be less than 10 % in the frequency range 2 MHz to 15 MHz. Below 2 MHz and above 15 MHz the **uncertainty** increases to approximately 20 %, primarily due to the signal-to-noise ratio available.

H.5 Limitations

One basic limitation of the TDS technique is the assumption that the propagation medium is non-dispersive. This does not pose any practical difficulty as the **hydrophone** calibration is carried out in degassed and deionized water.

Annex I (informative)

Determination of the phase response of hydrophones

I.1 Overview

The measurement of high-frequency or nonlinear distorted waveforms is often hindered by the non-ideal transfer characteristic of the **hydrophone** used. Correct results can be obtained by deconvolution of the measured waveforms using the complex-valued transfer function of the detection line in the frequency domain (see IEC 62127-1). This procedure involves the determination of the phase response of **hydrophones** in addition to the amplitude of sensitivity during calibration being measured [72],[100],[101],[102],[103]. This Annex I describes available techniques for the determination of phase responses of **hydrophones**.

In general, both the **end-of-cable loaded sensitivity** and the **end-of-cable open-circuit sensitivity** are complex-valued quantities, which can be expressed in amplitude and phase. The amplitude has been obtained from various different calibration techniques known for many years (see Clause 5, for example). The determination of phase involves two particular properties of the measurement: first, a coherent detection process for acquiring amplitude and phase during the measurement; second, a phase standard with a flat or at least well-known phase response required for absolute phase calibration that is calibrated by a primary calibration or whose phase response is known *a priori*.

NOTE "Absolute" is understood here in the sense of "referring to a standard source with ideally flat phase response".

To determine the phase response of **hydrophones**, techniques successfully applied to amplitude calibration can be extended to coherent detection. Additional difficulties, however, arise from the sensitivity of phase to both environmental conditions and the stringent conditions on adjustment of the distance between **hydrophone** and transducer. At a frequency of 20 MHz, a change in water temperature of 10 mK results in a phase change of 10° on a length of 100 mm. Since the water temperature can hardly be kept constant within this range for a long period of time, measurement techniques must acquire all data within seconds. Pointwise acquisition schemes, for example, used in reciprocity or optical interferometry, fail because of the long measurement cycle. In addition, a shift of 2 µm along the sound propagation direction results in a phase change of again 10° at 20 MHz demonstrating the difficult conditions in adjustment accuracy.

In Clause I.2, Clause I.3 and Clause I.4, three techniques are described which were successfully applied to phase calibration in different laboratories. First, the principle of operation and an example of a result are presented and second, uncertainties and limitations are discussed.

I.2 Coherent time delay spectrometry

I.2.1 Principle of operation

Time delay spectrometry exploits the finite propagation time of ultrasound in a medium to ensure **free field** conditions during calibration [89],[94],[17],[18]. The pressure wave emitted by the transducer takes some time to reach the **hydrophone** and the instantaneous frequency of the received signal is shifted by

$$\Delta f = \frac{f_{\text{Stop}} - f_{\text{Start}}}{t_S} \frac{l}{c} \quad (\text{I.1})$$

where

t_S is the sweep time;

l is the distance between **hydrophone** and transducer; and

c is the speed of sound in a medium (usually water)

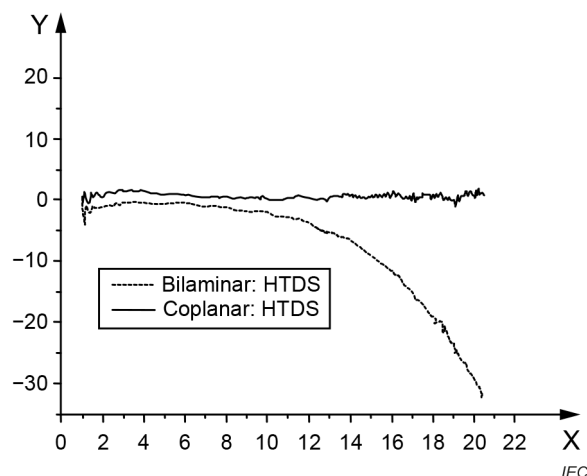
with respect to the frequency of the transmitting voltage applied to the transducer during a sweep between f_{Start} and f_{Stop} . If the analyser unit used for both generating the transmitting voltage and detecting the **hydrophone** signal can operate a frequency offset between the two signals, a narrow IF filter selects the length of the signal path of the sound. If the frequency offset is set to Δf , the direct path between transmitter and **hydrophone** is chosen and reverberation from the tank walls is filtered out.

In realizing the coherent detection technique, a network analyser has been exploited to generate and detect the signals. To ensure a fixed phase relation between the transmitting and receiving signal, a heterodyne scheme with a separate mixer closing the necessary phase locked loop (heterodyne time delay spectrometry (HTDS) [96]) is used. The network analyser is operated in the frequency offset mode and the local oscillator frequency set to $f_{LO} = 50$ MHz. A second mixer provides the transmitting signal fed into the transducer. Two measurements, one with the reference **hydrophone** and one with the **hydrophone** to be calibrated, are carried out under equal excitation conditions and the **hydrophone** frequency response is obtained by comparison of the results.

Another technique to separate unwanted signals from the measurement information works in the time domain instead of the frequency domain and uses the different propagation times of the signals [58],[96]. In the first step, the frequency response of the transducer–**hydrophone** transmission line is determined and the transducer is excited by a continuously swept voltage with a frequency increasing from f_{Start} to f_{Stop} . Then the frequency-dependent signal voltage acquired is converted to the time domain by an inverse FFT algorithm. The direct sound as well as reverberation signals and other disturbances are represented as signals on the time-scale appearing at their individual propagation times. Now a gate is set to time position $t' = cl$, and all unwanted signal contributions are cancelled out.

I.2.2 Example results

The coherent TDS techniques can be applied to all common **hydrophones**. Figure I.1 shows measurement results for two membrane **hydrophones** with an active diameter of 1 mm and a layer thickness of 25 μm . An increase in the amplitude of sensitivity is connected with a phase change caused by the thickness resonance of the membrane at 40 MHz and 22 MHz, respectively.



Key

X f (MHz)

Y $\arg(M)$ (°)

HTDS heterodyne time delay spectrometry

Figure I.1 – Phase of end-of-cable open-circuit sensitivity for two membrane hydrophones

Results are for using HTDS. The dotted line represents a bilaminar **hydrophone**, the continuous line represents a single layer **hydrophone**.

I.2.3 Uncertainties

The **uncertainties** depend on many parameters of the measurement. The most serious contribution arises, however, from the determination of the distance between the transducer and the **hydrophone**. It is mainly influenced by adjustment uncertainties and temperature fluctuations during the measurement. Table I.1 gives representative values for the calibration of a needle-type **hydrophone**.

Table I.1 – Example of uncertainties (where a coverage factor, $k = 2$, is used) for a HTDS phase calibration of a needle hydrophone with a diameter of 0,2 mm, expressed at a confidence level of 95 %

Frequency range MHz	Uncertainty Degrees (°)
2 to 5	15,9
5 to 12	8,8
12 to 20	13,0
20 to 30	19,1
30 to 40	25,0

NOTE The bilaminar **hydrophone** is of overall membrane thickness of 50 μm ; the single-layer **hydrophone** has a single PVDF layer of thickness of 25 μm .

NOTE For deconvolution procedures, both constant and linearly frequency-dependent phase shifts are irrelevant and a deviation of the "second-order" is the value of interest.

I.2.4 Limitations

The TDS-based techniques can be applied to all common **hydrophones**. Using suitable sound sources, a sufficient signal-to-noise ratio is obtained. Since it is a secondary calibration method, a phase standard is required for absolute amplitude and phase calibration.

I.3 Pulse calibration technique with optical multilayer hydrophone

I.3.1 Principle of operation

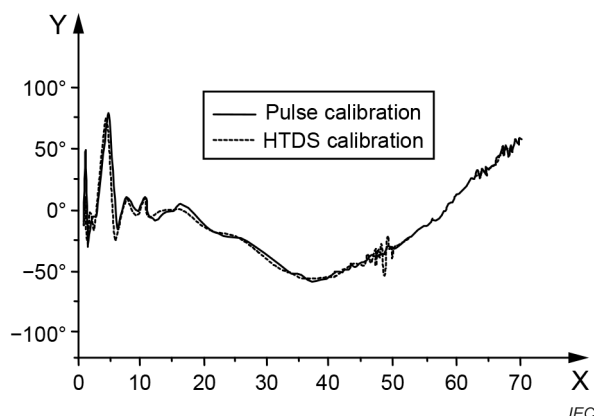
The TDS-based techniques provide sensitivity values only with respect to a reference. To obtain absolute values, a phase response standard is used that is primarily calibrated or whose phase is known *a priori*. An optical multilayer **hydrophone** has been shown to provide an excellent flat amplitude frequency response [104] which is expected to be accompanied by a just as flat phase response. Thus, the optical multilayer **hydrophone** is suitable for being used as the required phase standard.

The optical multilayer **hydrophone** comprises a glass substrate covered with dielectric optical coatings [72],[104],[105]. These coatings form a micro-interferometer, the optical reflectance of which is very sensitive to changes in the thickness and optical index of the layers. If the sound wave hits the **hydrophone**, the sound pressure deforms the layers and the optical reflectance change is measured by a simple detection scheme consisting of a He-Ne laser, two lenses and a photodetector. The substrate is obliquely illuminated to match the optical resonance, i.e. the working **wavelength** of the sensor to the laser **wavelength**. Due to the finite thickness of the glass substrate, the time window for measurements not distorted by acoustic reflections from the rear side is limited, and short pulses should be used for sound excitation.

The optical multilayer **hydrophone** is excited by short nonlinearly distorted sound wave pulses generated by a focusing transducer driven by a fast electrical pulse generator. The photodetector output voltage is proportional to the sound pressure and the signal can be acquired by a sampling oscilloscope and stored in a computer. An FFT procedure in the computer provides the frequency spectrum of the signal. The measurement is repeated under different matching conditions between the transducer and the generator, slightly shifting the fundamental and harmonic frequencies of the pulses to cover the complete frequency range of measurement with high signal strength. Note that both the fundamental and the harmonics are not narrow-band lines but broadband frequencies representing many spectral components. The frequency response is obtained by two measurements, the first with the optical **hydrophone** as the reference **hydrophone** and the second with the **hydrophone** to be calibrated.

I.3.2 Example of results

As an example, the phase of a needle **hydrophone** with a diameter of 0,2 mm was determined by the pulse technique with the optical multilayer **hydrophone**. See Figure I.2. For comparison, the HTDS measurement using the same reference is also depicted.



Key

X f (MHz)

Y $\arg(M)$ (°)

HTDS heterodyne time delay spectrometry

Figure I.2 – Phase of end-of-cable open-circuit sensitivity for a 0,2 mm diameter needle hydrophone

The dotted line represents results using HTDS. The continuous line represents results using pulse calibration.

I.3.3 Uncertainties

An assessment of the uncertainties is complicated by the FFT procedure because many effects are disguised by the numerical procedure. The main contribution to the **uncertainty** assessment comes, as for the TDS techniques, however, from the determination of the distance between the **hydrophone** and the transducer, and the values are not very different from those given in Table I.1. Linear phase terms (although not relevant for the deconvolution procedures) can be minimized using a cross-correlation technique [72].

NOTE Additional information on the treatment of uncertainties for complex-valued quantities is given in F.2.3.2.3 and in [68],[75],[106].

I.3.4 Limitations

Because of the finite thickness of the glass substrate, short pulses should be used for sound excitation of the optical multilayer **hydrophone**. This limits the application range at the low frequency side to about 500 kHz. To achieve high enough frequencies for deconvolution procedures, strongly focused nonlinear pulses are used, limiting the active diameter of the **hydrophones** to < 0,5 mm. In combination with HTDS, a calibration service, however, can be established that covers the complete spectrum of common piezoelectric and optical **hydrophones**.

I.4 Nonlinear pulse propagation modelling

I.4.1 Principle of operation

The techniques in Clauses I.2 and I.3 use the comparison with a known standard (or reference) device for determination of phase response. Alternatively, a known sound field can be applied as a reference that is predicted by a theoretical solution. It should, however, be ensured, in any way, that the experimental sound field agrees with the theoretical solution.

One possible realization is the use of nonlinear pulse propagation [107],[108]. A single element transducer generates a short acoustic pulse focused on a long distance. During the nonlinear propagation, several harmonics are generated with a defined phase relation to the fundamental, which can be calculated by a theoretical model. If the relative phases of the harmonics are measured, a comparison to the model yields the phase response of the measurement system (not of the **hydrophone** alone).

I.4.2 Limitations

The pulse propagation technique yields the phase response of the complete detection line. Only if the responses of all other elements are known, the **hydrophone** phase response can be derived. A suitable sound propagation model should be used that should be carefully validated with respect to the experimental field to be applied to the **hydrophone**.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62127-2:2025

Annex J (informative)

Maximum size considerations for the active element of a hydrophone

J.1 Maximum hydrophone size in the near field case (Annex G – hydrophone position concept A)

If the **near field hydrophone** position concept in accordance with Annex G is chosen, the maximum **hydrophone** radius is, in principle, only limited by the radius of the usable paraxial region in the sense of G.4.1. If, however, the recommended lateral displacement check shows amplitude variations, these should be less than ± 1 dB for a **hydrophone** displacement by an amount equal to the **effective hydrophone radius** in all lateral directions.

J.2 Maximum hydrophone size in the far field case (Annex G – hydrophone position concept B)

For an assessment, a simple approximation based on linear propagation in the **far field** of a plane-circular piston source can be given as

$$a_{\max} = \frac{cz}{8f a_t} \quad (\text{J.1})$$

NOTE 1 Strictly, this Formula applies only if $z \gg a_t$ and $z \ll 20 f a_t^2 / c$ (see [48]) but this is generally fulfilled in the measurements dealt with in Clause J.2.

NOTE 2 In [48] a theoretical correction procedure has been derived, to multiply the measured pressure amplitude by $(1 + \delta_{av})$ in order to obtain the true pressure amplitude, where δ_{av} is given by $\delta_{av} = [\pi a / (16 a_{\max})]^2$ with $a_{\max}$ as in Formula (J.1). This applies only to the reference **hydrophone** orientation, i.e. with the **hydrophone** surface perpendicular to the **beam axis**.

NOTE 3 Formula (J.1) can also be used in the case of **hydrophone** position concept D (see Annex G).

J.3 Maximum hydrophone size in the far field case with special reference to a long propagation path in order to achieve nonlinear distortion (Annex G – hydrophone position concept C)

The temporal waveform at the field point used for the intercomparison consists of a number of harmonic frequencies. It is important that the pressure distribution of each of these is sufficiently broad to ensure that spatial averaging over the **hydrophone** element does not degrade the provided calibration accuracy. With a prudent choice of transducer diameter and propagation distance, plane wave conditions over the effective receive aperture of the **hydrophone** can be approximated.

As the higher harmonics have **beamwidths** that progressively decrease with increasing frequency, spatial averaging will be more important at the upper frequency limit of the stated frequency band of the **hydrophone**, f_u . An estimate of the effect of spatial averaging can be made by considering the highest frequency harmonic **beamwidth** using a parameter γ given by the ratio of the -6 dB **beamwidth** of the f_u component to the effective **hydrophone** diameter, e.g. twice the **effective hydrophone size**.

NOTE 1 The **beamwidths** referred to in the expression are measured values and, providing $\gamma > 2$, measured and actual (true) **beamwidths** can be considered to be equivalent. The condition of $\gamma = 2$ corresponds to a spatial averaging correction of 7,5 %.

A spatial averaging error of less than 3,5 % requires $\gamma > 3$. Reducing the permissible error to 2 % requires $\gamma > 4$ [109].

NOTE 2 γ is referred to as α in [109].

The recommended maximum radius of the **hydrophone** is given by $a_{\max} = cz / (8f a_t)$. Taking $z = a_t^2 f / c$, this corresponds to a γ value of approximately 2,8.

Simple guidelines establishing the experimental conditions required to limit the effect of spatial averaging to this recommended level can be derived. Two assumptions are made during the analysis:

- the **beamwidth** of the fundamental frequency component under the nonlinear conditions used for the intercomparison is identical to that derived from linear propagation;

NOTE 3 Changes in the pressure distribution occur at progressively higher values of σ leading to a broadening of the beam profile of the individual harmonics [53]. The current analysis therefore represents a worst-case scenario.

- the harmonic **beamwidths** are given by $w_f / \sqrt{n}$, where w_f is the **beamwidth** of the fundamental component and n is the harmonic number [110].

If f_f is the fundamental drive frequency of the signal used to generate nonlinear distortion and f_u is the upper frequency limit of the stated frequency band of the **hydrophone** for the calibration, then, assuming an ideal plane-piston transducer, an expression can be derived for $z_{\min}$, the minimum distance between the transducer and the **hydrophone** required to keep the effect of spatial averaging below the recommended level. The expression for $z_{\min}$, valid for large values of ka_t , is:

$$z_{\min} = 0,451 \gamma a_h k a_t \sqrt{\frac{f_u}{f_f}} \quad (\text{J.2})$$

where

a_h is the **effective hydrophone size**;

$k = 2\pi f_f / c$ is the circular wave number;

a_t is the **effective radius of a non-focusing ultrasonic transducer**.

Formula (J.2) can be used to derive approximate values of $z_{\min}$, although due to nonlinear broadening, smaller distances can actually be used.

In any implementation of the concept C method (see Annex G), the frequency content of the waveform should be investigated at various positions off-axis to verify the nature of the pressure distribution.

NOTE 4 Formula (J.2) can also be solved for a_h yielding the maximum **hydrophone** radius at a given distance z .

Annex K (informative)

Two-transducer reciprocity calibration method

K.1 General

The two-transducer reciprocity method involves the assessment of the acoustic pressure in a defined spot in the ultrasonic field. To accomplish that, the first step is to assess the ultrasonic field generated by an auxiliary transducer. The second step is to place the active element of the **hydrophone** to be calibrated in a defined spot for which the acoustic pressure can be defined as precisely as possible.

K.2 Fundamentals of reciprocity

A reversible transducer has an apparent transmitting current response $S_t^*(\omega)$ and apparent receiving voltage response $M_t^*(\omega)$ defined as

$$S_t^*(\omega) = \frac{p_0(\omega)}{I_t(\omega)} \text{ and } M_t^*(\omega) = \frac{U_t(\omega)}{p_i(\omega)} \quad (\text{K.1})$$

where p_0 is the acoustic pressure generated by the auxiliary transducer at its surface, I_t is the transmitting current of the transducer, p_i is the acoustic pressure incident on the transducer surface and U_t is the voltage generated by the transducer in the receiving mode.

NOTE The term 'acoustic pressure' is used in Annex K, although it is recognized that in any practical situation this quantity will vary spatially. Similarly, the electrical output of transducer devices used in reception mode will be dependent on the acoustic pressure spatially averaged on their active surface.

If the transducer is reciprocal, the reciprocity coefficient for plane waves J_p relates $S_t^*(\omega)$ and $M_t^*(\omega)$ as in Formula (K.2):

$$J_p = \frac{M_t^*(\omega)}{S_t^*(\omega)} \quad (\text{K.2})$$

By definition, $J_p = \frac{2A_{ER}}{\rho c}$, where A_{ER} is the effective radiating area of the transducer (IEC 61689).

If the wave generated by a reciprocal transducer propagates in water and reflects off with a normal incidence at a reflector distant d_1 from the transducer surface placed on its axis of symmetry, it produces an incident wave whose acoustic pressure can be measured by the reciprocal transducer. Relating the definition by Formula (K.3)

$$p_i(\omega) = p_0(\omega) R_{RT} e^{-2\alpha d_1} G_{tt} \quad (\text{K.3})$$

where α is the amplitude attenuation coefficient of plane waves in water and G_{tt} is the correction due to the fact that the returning waveform is generated and measured by a finite transducer, i.e. it accounts for the diffraction in the propagation field and is related to the generation and reception by the transducer. R_{RT} is the amplitude reflection coefficient of the reflector. Combining Formulae (K.1), (K.2) and (K.3), the acoustic pressure generated by a reciprocal transducer at its surface is related to electrical and geometrical quantities as in Formula (K.4):

$$p_0(\omega) = \sqrt{U_t(\omega) I_t(\omega) \frac{\rho c}{2A_{ER} R_{RT} e^{-2\alpha d_1} G_{tt}}} \quad (K.4)$$

A normal incidence reflection on the reflector is necessary for the self-calibration. This is ensured by maximizing the waveform reflection from the reflector as measured by the transducer. The driven electrical current I_t is measured with the auxiliary transducer in the output mode. The output voltage U_t is measured when the auxiliary transducer is in the receiving mode. It should be an open-circuit voltage, and electrical corrections should be applied to the measured current and voltage.

In sequence, the **hydrophone** active element is placed in a determined spot in the ultrasonic field, and the acoustic pressure is maximized in order to assure the alignment of the **hydrophone** active element symmetry axis and the transducer symmetry axis. The acoustic pressure at this point is calculated using Formula (K.5):

$$p_h(\omega) = p_0(\omega) e^{-\alpha d_h} G_{th} \quad (K.5)$$

where p_h is the measured acoustic pressure incident at the centre of the **hydrophone's** active element if the **hydrophone** were removed, d_h is the distance from the transducer surface to the active **hydrophone** element measured on the symmetry axis, and G_{th} is the correction that accounts for the diffraction in the propagation field and is related to the generation transducer and the reception by the **hydrophone**.

The open-circuit voltage from the **hydrophone** U_h should be measured with the average incident acoustic pressure p_{hav} over its active element. The modulus of the end of cable sensitivity is therefore given by Formula (K.6):

$$M(\omega) = \frac{U_h(\omega)}{p_{hav}(\omega)} \quad (K.6)$$

K.3 Electrical quantities

The transmitting current I_t should be measured as precisely as possible, which can be performed in many different ways. Measuring the voltage drop across a calibrated impedance or using a current probe are typical electrical set-ups.

The output voltage from the transducer in the receiving mode U_t should be measured unloaded by the transducer, i.e. as an open circuit voltage. One way to perform that is to measure the current over a short circuit replacing the transducer. The open circuit voltage is

$$U_t(\omega) = U_{\text{load}}(\omega) \frac{I_{\text{sc}}(\omega)}{I_t(\omega)} \quad (\text{K.7})$$

where U_{load} is the voltage measured with the transducer coupled to the system and I_{sc} is the current measured over a short circuit jumper replacing the transducer.

In the case of a constant load assumed throughout the calibration process, corrections described in Annex C can be applied directly to the final assessed sensitivity.

K.4 Diffraction correction and loss due to nonlinear sound propagation

Due to the finite size of auxiliary transducers and **hydrophones**, a diffraction pattern develops in the ultrasonic field. In the two-transducer reciprocity method, two diffraction corrections are applied:

- G_{th} , correction that accounts for the diffraction in the propagation field and is related to the waveform generation by the transducer and the reception by the **hydrophone**;
- G_{tt} , correction due the generation and the reception by the transducer.

Many references can be used to theoretically describe the diffraction loss in ultrasonic fields [22],[111],[112] and a numerical implementation of diffraction corrections can be applied [113],[114],[115],[116].

K.5 Ultrasonic field

For the two-transducer reciprocity calibration, the ultrasonic field is shaped by the influence of many aspects, mainly:

- diffraction pattern for both the auxiliary transducer and **hydrophone** (see Clause K.3);
- signal type (see Annex G and [15],[19]);
- reflector reflection coefficient (see 9.4.3);
- water path attenuation (see [117]);
- speed of sound (see [54]).

The amplitude attenuation coefficient for plane ultrasonic waves α in the megahertz frequency range is proportional to f^2 and should be taken from a polynomial fit as a function of temperature T in the temperature range from 0 °C to 60 °C, see Annex E.

If the amplitude attenuation coefficient in m^{-1} is going to be given in dB m^{-1} , its numerical value must be multiplied by $20 \log_{10}(e) = 8,69$.

The speed of sound is presented in tables in [54], and polynomial fits are available for different accuracies, temperature ranges, and barometric pressures. The contribution for the **uncertainty** budget should be taken into account regarding the formula used to assess the speed of sound.

- a) Temperature range: 0 °C to 100 °C, at atmospheric pressure; accuracy better than 0,02 ms⁻¹ (see [118]).

$$c = \left(\begin{aligned} &1402,39 + 5,03836 \{T\} - 0,0581173 \{T\}^2 \\ &+ 3,34638 \cdot 10^{-4} \{T\}^3 - 1,48260 \cdot 10^{-6} \{T\}^4 \\ &+ 3,16585 \cdot 10^{-9} \{T\}^5 \end{aligned} \right) \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{K.8})$$

- b) Temperature range: 10 °C to 40 °C, at atmospheric pressure; accuracy better than 0,18 ms⁻¹ (see [118])

$$c = (1405,03 + 4,624 \{T\} - 0,0383 \{T\}^2) \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{K.9})$$

- c) Temperature range: 15 °C to 35 °C, at atmospheric pressure; accuracy better than 0,20 ms⁻¹ (see [119])

$$c = (1404,3 + 4,7 \{T\} - 0,04 \{T\}^2) \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{K.10})$$

For the atmospheric pressure dependence of the speed of sound, see [120].

K.6 Experimental set-up

K.6.1 General

Different experimental arrangements have been proposed to perform the two-transducer reciprocity calibration. Regardless of the electrical set-up, the main concern in the experimental preparation comprises the positioning of the auxiliary transducer, reflector, and **hydrophone**. Three experimental set-ups are shown in K.6.2, K.6.3 and K.6.4, each of them presenting advantages and drawbacks.

K.6.2 Twisting reflector

Figure K.1 depicts an arrangement in which the reflector is twisted between the two steps of the calibration procedure. Care should be taken to avoid a large angle of rotation of the reflector. A maximum of 10° would be acceptable, but the **uncertainty** of the **hydrophone** voltage measurement due to non-normal reflection should be considered. Moreover, for large membrane **hydrophones**, it can be a negative issue to set the rotation angle small. Another negative aspect of this arrangement is that it may not be simple to rotate large and heavy stainless-steel reflectors with appropriate accuracy.

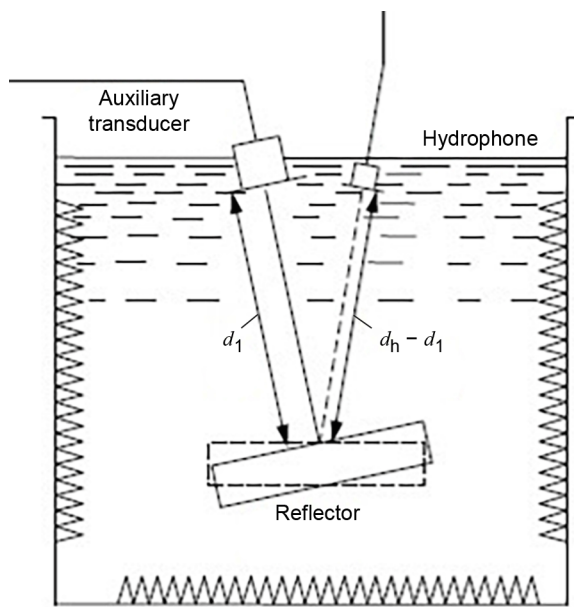


Figure K.1 – Experimental set-up with a twisting reflector [22]

K.6.3 Translational reflector

Figure K.2 discloses an arrangement in which the reflector is inserted in the path between the auxiliary transducer and the **hydrophone**.

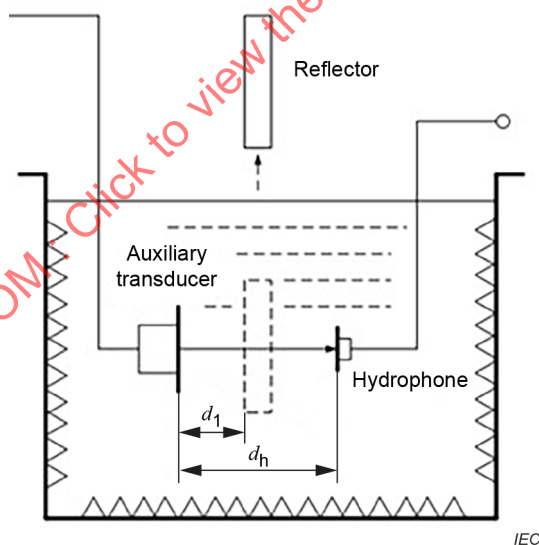


Figure K.2 – Experimental set-up with a translational reflector [23]

K.6.4 Translational auxiliary transducer

In Figure K.3, the **hydrophone** and the reflector remain still during the measurement procedure, and the moving element is the transducer.

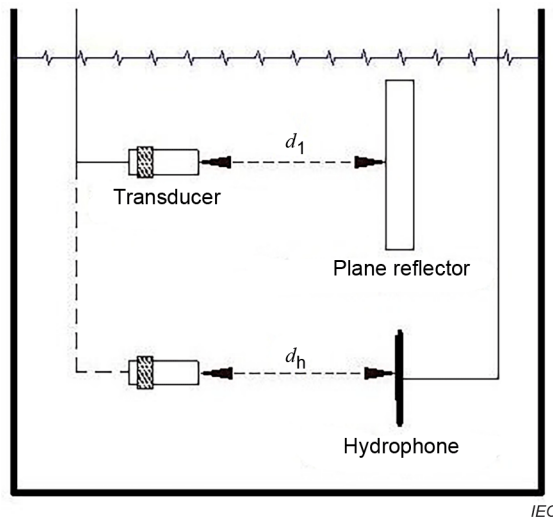


Figure K.3 – Experimental set-up with a translational auxiliary transducer [24]

K.7 Hydrophone calibration using a calibrated spherically curved auxiliary transducer based on the self-reciprocity method

The transmitting response to current at the geometric focus of a spherically curved transducer calibrated using the self-reciprocity method (IEC TS 62903 [121]) is given by Formula (K.11):

$$S_{If} = \frac{p_f}{I_T} = kh \sqrt{\frac{\rho c U_0 I_k}{2 A_{av} G_{sf} I_T^2}} = kh \sqrt{\frac{\rho c U_0 I_{echo}}{2 A_{av} G_{sf} I_T^2}} \quad (K.11)$$

where

$A = 2\pi R h$	is the effective surface area of the spherically curved transducer;
p_f	is the pressure on the geometric focus;
I_T	is the excitation current;
k	is the circular wave number;
$h = R(1 - \cos \beta)$	is the depth of curvature of the radiation surface;
ρc	is the acoustic characteristic impedance;
U_1	is the first echo voltage on the electric end of the transducer from the reflector on the focal plane in self-reciprocity calibration;
I_k	is the short current of the burst generator;
r_{av}	is the average reflection coefficient of spherically curved transducer;
G_{sf}	is the diffraction correction coefficient for spherically curved transducer in free field self-reciprocity calibration;
U_0	is the open circuit voltage of the burst generator;
I_{echo}	is the first echo current generated by the transducer in self-reciprocity calibration.

The acoustic pressure distribution in the geometric focal plane is given by Formula (K.12) [122]:

$$p(\theta) = p_f \text{Jinc}(ka_t \sin\theta) \cos\theta \quad (\text{K.12})$$

where

$$p_f = S_{If} I_T;$$

$$\text{Jinc}(ka_t \sin\theta) = \frac{2J_1(ka_t \sin\theta)}{ka_t \sin\theta}, \text{ where } J_1(x) \text{ is the first-order Bessel function of the first kind;}$$

θ is the included angle between the **beam axis** and the line through the point on the geometric focal plane and the centric point of the focusing transducer surface;

a_t is the transducer radius.

When a **hydrophone** to be calibrated is placed at the geometric focus and aligned with the **beam axis** of the focusing transducer, the average pressure p_{hav} on the sensitive area of the **hydrophone** is given by Formula (K.13):

$$p_{\text{hav}} = \frac{p_f}{A_h} \int_0^{\theta_m} \text{Jinc}(ka_h \sin\theta) \cos\theta dA = G_c(ka_h, \theta_m) p_f \quad (\text{K.13})$$

$$\text{with} \quad G_c(ka_h, \theta_m) = 2 \cot^2 \theta_m \int_0^{\theta_m} \text{Jinc}(ka_h \sin\theta) \tan\theta \sec\theta d\theta \quad (\text{K.14})$$

where

$$A_h = \pi a_h^2 = \pi R^2 \tan^2 \theta_m;$$

A_h is the effective area of the **hydrophone**;

a_h is the **effective hydrophone size**;

$$\theta_m = \tan^{-1}\left(\frac{a_h}{R}\right);$$

$$dA = 2\pi R^2 \tan\theta \sec^2\theta d\theta.$$

Then the modulus of the **hydrophone** sensitivity is given by

$$|\underline{M}| = \frac{U_h}{p_{\text{hav}}} \quad (\text{K.15})$$

where U_h is the output voltage of the **hydrophone** to be calibrated.

The relationship of G_c and θ_m for several values of ka_h is shown in Figure K.4. The values of $G_c(ka_h, \theta_m)$ are listed in Table K.1 [123].

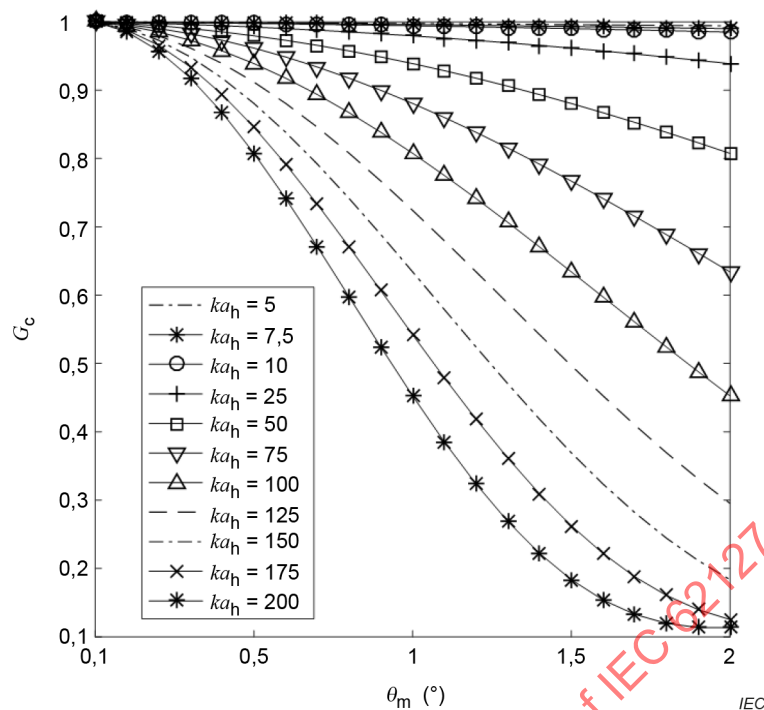


Figure K.4 – Relationship of G_c and $\theta_m(^{\circ})$ for several values of ka_h

Table K.1 – Values of the correction coefficient $G_c(ka_h, \theta_m)$ for the spatial average effect of the free-field acoustic pressure over the hydrophone surface if it were removed

$\theta_m(^{\circ})$	ka_h					
	5,0	7,5	10,0	25,0	50,0	75,0
0,0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0
0,1	0,999 8	0,999 7	0,999 6	0,998 9	0,997 6	0,996 1
0,2	0,999 6	0,999 4	0,999 1	0,997 6	0,994 4	0,990 3
0,3	0,999 4	0,999 0	0,998 7	0,996 1	0,990 3	0,982 6
0,4	0,999 1	0,998 7	0,998 1	0,994 3	0,985 3	0,973 0
0,5	0,998 9	0,998 3	0,997 6	0,992 4	0,979 6	0,961 7
0,6	0,998 6	0,997 9	0,997 0	0,990 2	0,973 0	0,948 6
0,7	0,998 4	0,997 4	0,996 4	0,987 9	0,965 6	0,933 9
0,8	0,998 1	0,997 0	0,995 7	0,985 3	0,957 5	0,917 6
0,9	0,997 8	0,996 5	0,995 0	0,982 5	0,948 6	0,899 8
1,0	0,997 5	0,996 0	0,994 3	0,979 5	0,938 9	0,880 6
1,1	0,997 2	0,995 5	0,993 5	0,976 3	0,928 6	0,860 1
1,2	0,996 9	0,995 0	0,992 7	0,972 9	0,917 5	0,838 3
1,3	0,996 6	0,994 4	0,991 9	0,969 3	0,905 8	0,815 5
1,4	0,996 3	0,993 8	0,991 0	0,965 5	0,893 5	0,791 6
1,5	0,995 9	0,993 2	0,990 1	0,961 5	0,880 5	0,766 9
1,6	0,995 6	0,992 6	0,989 2	0,957 4	0,867 0	0,741 4
1,7	0,995 2	0,992 0	0,988 2	0,953 0	0,852 9	0,715 2
1,8	0,994 8	0,991 3	0,987 2	0,948 4	0,838 2	0,688 5
1,9	0,994 5	0,990 7	0,986 1	0,943 7	0,823 1	0,661 4
2,0	0,994 1	0,990 0	0,985 0	0,938 8	0,807 5	0,634 1

$\theta_m(^{\circ})$	ka_h				
	100,0	125,0	150,0	175,0	200,0
0,0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0
0,1	0,994 4	0,992 4	0,990 3	0,987 9	0,985 3
0,2	0,985 3	0,979 6	0,973 0	0,965 7	0,957 5
0,3	0,973 0	0,961 7	0,948 6	0,933 9	0,917 6
0,4	0,957 5	0,939 0	0,917 6	0,893 6	0,867 1
0,5	0,939 0	0,911 9	0,880 6	0,845 8	0,807 7
0,6	0,917 6	0,880 6	0,838 4	0,791 7	0,741 5
0,7	0,893 6	0,845 7	0,791 7	0,732 8	0,670 6
0,8	0,867 1	0,807 7	0,741 5	0,670 6	0,597 4
0,9	0,838 4	0,766 9	0,688 6	0,606 6	0,524 0
1,0	0,807 7	0,724 1	0,634 1	0,542 2	0,452 7
1,1	0,775 3	0,679 6	0,578 9	0,479 1	0,385 3
1,2	0,741 4	0,634 1	0,524 0	0,418 4	0,323 5
1,3	0,706 4	0,588 1	0,470 2	0,361 4	0,268 8
1,4	0,670 6	0,542 2	0,418 4	0,309 1	0,221 9
1,5	0,634 1	0,496 9	0,369 3	0,262 4	0,183 6
1,6	0,597 3	0,452 7	0,323 5	0,221 9	0,153 9
1,7	0,560 5	0,410 0	0,281 7	0,187 9	0,132 8
1,8	0,524 0	0,369 3	0,244 3	0,160 5	0,119 7
1,9	0,487 9	0,330 9	0,211 5	0,139 8	0,113 6
2,0	0,452 7	0,295 2	0,183 6	0,125 3	0,113 6

Bibliography

- [1] HARRIS, GR., HOWARD SM., HURRELL, AM., LEWIN, PA., SCHAFER, ME., WEAR, KA., WILKENS, V. and ZEQUIRI, B. *Hydrophone measurement for biomedical ultrasound applications: a review*, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., Febr. 2023, vol. 70, iss. 2, p. 85-100
- [2] IEC 60565-1, *Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration of hydrophones – Part 1: Procedures for free-field calibration of hydrophones*
- [3] IEC 60565-2, *Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration of hydrophones – Part 2: Procedures for low frequency pressure calibration*
- [4] HARRIS, GR. *Are current hydrophone low frequency response standards acceptable for measuring mechanical/cavitation indices?* Ultrasonics, 1996, vol. 34, iss. 6, p. 649-654
- [5] IEC 61828:2020, *Ultrasonics – Transducers – Definitions and measurement methods regarding focusing for the transmitted fields*
- [6] IEC 60050-801, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 801: Acoustics and electroacoustics*
- [7] IEC 60050-802, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 802: Ultrasonics*
- [8] IEC 60050-845, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 845: Lighting*
- [9] RADULESCU, EG., LEWIN, PA., NOWICKI, A. and BERGER, WA. *Hydrophones' effective diameter measurements as a quasi-continuous function of frequency*. Ultrasonics, 2003, vol. 41, iss. 8, p. 635-641
- [10] ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*
- [11] RAJAGOPAL, S., ROBINSON, S. P., ABLITT, J., MILORO, P., WANG, L., ZEQUIRI, B., HURRELL, A. *On the importance of consistent insonation conditions during hydrophone calibration and use*, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., Feb. 2023, vol. 70, iss. 2, p. 120-127
- [12] FAY, B., LEWIN, PA., LUDWIG, G., SESSLER, GM. and YANG, G. *The influence of spatial polarization distribution on spot poled PVDF membrane hydrophone performance*. Ultrasound Med. Biol., 1992, vol. 18, no. 6-7, p. 625-635
- [13] RADULESCU, EG., WÓJCIK, J., LEWIN, PA., NOWICKI, A. and BERGER, WA. *The influence of finite aperture and frequency response of ultrasonic hydrophone probes on the determination of acoustic output*. Ultrasonics, April 2004, vol. 42, iss. 1-9, p. 367-372
- [14] RADULESCU, EG., WÓJCIK, J., LEWIN, PA. and NOWICKI, A. *Probing acoustic fields of clinically relevant transducers: the effect of hydrophone probes' finite apertures and bandwidths*. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., October 2004, vol. 51, iss. 10, p. 1262-1270
- [15] HARRIS, GR., GAMMELL, PA., RADULESCU, EGR. and LEWIN, PA. *Interlaboratory evaluation of hydrophone sensitivity calibration from 0.1 to 2 MHz via time delay spectrometry*. Ultrasonics, April 2004, vol. 42 iss. 1-9, p. 349-353

- [16] ISO/IEC Guide 99:2007, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*
- [17] PEDERSON, PC., LEWIN, PA. and BJORNO, L. *Application of time-delay spectrometry for calibration of ultrasonic transducers*. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., March 1988, vol. 35, iss. 2, p. 185-205
- [18] GAMMELL, PM. and HARRIS, GR. *Time delay spectrometry for hydrophone calibrations below 1 MHz*. J. Acoust. Soc. Am., 1999, vol. 106, L41-6
- [19] ISAEV, A.E. and Matveev A.N. *Calibration of Hydrophones in a Field with Continuous Radiation in a Reverberating Pool*. Acoustical Physics, 2009, vol. 55, no. 6, p. 762-770
- [20] COSTA-FELIX, R.P.B. and MACHADO, J.C. *Output bandwidth enhancement of a pulsed ultrasound system using a flat envelope and compensated frequency-modulated input signal: Theory and experimental applications*. Measurement, 2015, vol. 69, p. 146-154
- [21] ISAEV, A.E. *A Quality Criterion for Obtaining Free-Field Conditions when Calibrating a Hydroacoustic Receiver in a Water Tank with Reflecting Sides*. Measurement Techniques, 2014, vol. 57, no. 5, p. 549-556
- [22] BRENDDEL, K., LUDWIG, G. *Calibration of Ultrasonic Standard Probe Transducers*. Acustica, 1976, vol. 36, p. 203
- [23] SHOU W, DUAN S, HE P, XIA R, QIAN D. *Calibration of a Focusing Transducer and Miniature Hydrophone As Well As Acoustic Power Measurement Based on Free-Field Reciprocity in a Spherically Focused Wave Field*. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., 2006, vol. 53 no. 3, p. 564-570
- [24] OLIVEIRA, E.G., COSTA-FELIX, R.P.B. and MACHADO, J.C. *Primary reciprocity-based method for calibration of hydrophone magnitude and phase sensitivity: complete tests at frequencies from 1 to 7 MHz*. Ultrasonics, 2015, vol. 58, p. 87-95
- [25] BEISSNER, K. *On the plane-wave approximation of acoustic intensity*. J. Acoust. Soc. Am., 1982, vol. 71, p. 1406–1411
- [26] FICK, SE. *The NIST power reference source*. In ZISKIN, MC. and LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exposimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992, Ch. 6, p. 169-183
- [27] BEISSNER, K. *Radiation force and force balances*. In ZISKIN, MC. and LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exposimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992, p. 127-142
- [28] WILKENS, V. and MOLKENSTRUCK, W. *Broadband PVDF membrane hydrophone for comparisons of calibration methods up to 140 MHz*. IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Contr., 2007, vol. 54, p. 1784-1791
- [29] BEYER, RT. *Nonlinear Acoustics*. U.S. Government Printing Office, 1975
- [30] CARSTENSEN, EL. and MUIR, TG. *The role of nonlinear acoustics in biomedical ultrasound*. In GREENLEAF, J., ed., *Ultrasound Tissue Characterization*. Boca Raton: CRC Press, 1986, Ch. 3, p. 57-79
- [31] BJORNO, L. and LEWIN, PA. *Measurement of B/A parameter in tissues*. In GREENLEAF, J., ed., *Ultrasound Tissue Characterization*. Boca Raton: CRC Press, 1986, Ch. 6, p. 141-163

- [32] LEWIN, PA. *Practical implementations and technology of measurement devices*. In ZISKIN, MC. and LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exposimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992. Ch. 7, p. 185-215
- [33] DUCK, FA. and MARTIN, K. *Exposure values for medical devices*. In ZISKIN, MC. and LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exposimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992, Ch. 11, p. 315-344
- [34] BACON, DR. *Characteristics of a PVDF membrane hydrophone for use in the range 1-100 MHz*. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, January 1982, vol. SU-29, no. 1, p. 18-25
- [35] LEWIN, PA. *Linearity of the polymer probes*. Proc. WFUMB. Sydney. Elmsford, NY: Pergamon Press, 1985, p. 537
- [36] KRAYNAK, T., SCHAFER, ME. and KRAKHMAN, V. *Development of a cost-effective shock wave hydrophone*. 1994 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 1994, p. 1805-1808
- [37] DODICK, JM. *Surgical instrument with input power transducer*. US Patent No. 5324282
- [38] LEWIN, PA., BHATIA, R., ZHANG, Q., and DODICK, J. *Characterization of optoacoustic surgical devices*. IEEE Ultrasonics Symposium, 1995
- [39] SCHAFER, ME. *Techniques of hydrophone calibration*. In ZISKIN, MC. and LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exposimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992, Ch. 8, p. 217-255
- [40] TRIER, HG. *Ultrasonic devices for surgery (cataract removal and vitrectomy) in ophthalmology*. J. d'Echographie Med. Ultrasonore, 1985, vol. 1, p. 17-23
- [41] BEISSNER, K. *Schallfelduntersuchungen an ophthalmologisch-chirurgischen Ultraschallgeraeten*. In Fortschritte d. Akustik – DAGA '80. Berlin: VDE-Verlag, 1980, p. 567-570
- [42] SCHAFER, ME. and BROADWIN, A. *Acoustical characterization of ultrasonic surgical devices*. 1994 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 1994, p. 1903-1906
- [43] MEEKS, S. and TING, R. *The evaluation of static and dynamic stress on the piezoelectric and dielectric properties of PVDF*. J. Acoust. Soc. Am., 1984, vol. 75, p. 1010
- [44] TANCRELL, RH., WILSON, DT. and RICKETTS, D. *Properties of PVDF polymer for sonar*. 1985 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 1985, p. 624-627
- [45] HERMAN, BA. and HARRIS, GR. *Calibration of miniature ultrasonic receivers using a planar scanning technique*. J. Acoust. Soc. Am., 1982, vol. 72, p. 1357-1363
- [46] PINKERTON, JMM. *The absorption of ultrasonic waves and liquids and its relation to molecular constitution*. Proc. Phys. Soc., 1949, vol. 62, p. 129-141
- [47] CORBETT, SS. *The influence of nonlinear fields on miniature hydrophone calibration using the planar scanning technique*. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., March 1988, vol. 35, iss. 2, p. 162-167
- [48] BEISSNER, K. *Maximum hydrophone size in ultrasonic field measurements*. Acustica, 1985, vol. 59, p. 61-66

- [49] RADULESCU, EG., LEWIN, PA., GOLDSTEIN, A. and NOWICKI, A. *Hydrophone spatial averaging corrections from 1-40 MHz*. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., November 2001, vol. 48, iss. 6, p. 1575-1580
- [50] RADULESCU, EG., LEWIN, PA. and NOWICKI, A. *1-60 MHz Measurements in Focused Acoustic Fields using Spatial Averaging Corrections*. Ultrasonics, May 2002, vol. 40, iss. 1-8, p. 497-501
- [51] AIUM/NEMA. *Safety standard for diagnostic ultrasound equipment*. J. Ultrasound Med., 1983, Apr, 2 (4 Suppl), S1-50. PMID: 6854728.
- [52] BACON, DR., *A new method for ultrasonic hydrophone calibration*. 1982 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 1982, p. 700-704
- [53] LOCKWOOD, JC., MUIR, TG. and BLACKSTOCK, DT. *Directive harmonic generation in the radiation field of a circular piston*. J. Acoust. Soc. Am., 1973, vol. 53, p. 1148-1153
- [54] DEL GROSSO, VA. and MADER, CW. *Speed of sound in pure water*. J. Acoust. Soc. Am., 1972, vol. 52, p. 1442-1446
- [55] BILANIUK, N. and WONG, GSK. *Speed of sound in pure water as a function of temperature*. J. Acoust. Soc. Am., 1993, vol. 93, p.2306
- [56] IEC TR 62781, *Ultrasonics – Conditioning of water for ultrasonic measurements*
- [57] RADULESCU, EG., WÓJCIK, J., LEWIN, PA. and NOWICKI, A. *Nonlinear propagation model for ultrasound hydrophones calibration in the frequency range up to 100 MHz*. Ultrasonics, June 2003, vol. 41, iss. 4, p. 239-245
- [58] RADULESCU, EG., LEWIN, PA., WÓJCIK, J. and NOWICKI, A. *Calibration of ultrasonic hydrophone probes up to 100 MHz using time gating frequency analysis and finite amplitude waves*. Ultrasonics, June 2003, vol. 41, iss. 4, p. 247-254
- [59] BLEEKER, HJ. and LEWIN, PA. *A new method of ultrasonic hydrophone calibration using KZK wave modeling*. J. Acoust. Soc. Am., 1998, vol. 103 p. 2962
- [60] BLEEKER, HJ. and LEWIN, PA. *A novel method for determining calibration and behavior of PVDF ultrasonic hydrophone probes in the frequency range up to 100 MHz*. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., November 2000, vol. 47, iss. 6, p. 1354-1362
- [61] LEWIN, PA., UMCHID, S., SUTIN, A. and SARVAZYAN, A. *Beyond 40 MHz frontier: the future technologies for calibration and sensing of acoustic fields*. J. Phys.: Conf. Ser., 2004, vol. 1, p. 38-43
- [62] REIBOLD, R. and MOLKENSTRUCK, W. *Laser interferometric measurement and computerized evaluation of ultrasonic displacements*. Acta Acustica united with Acustica, 1981, vol. 49, iss.3, p. 205-211
- [63] REIBOLD, R. and MOLKENSTRUCK, W. *Investigation of pulse-excited hydrophones for ultrasonic field measurements using laser interferometry*. Ultrasonics, March 1987, vol. 25, iss. 2, p. 114-118
- [64] SCRUBY, CB. and DRAIN, LE. *Laser Ultrasonics: Techniques and Applications*. Bristol: Adam Hilger, 1990

- [65] REIBOLD, R. and MOLKENSTRUCK, W. *Optical measuring techniques*. In ZISKIN, MC. and LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exposimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992, Ch. 5, Part C, p. 143-162
- [66] KOCH, Ch., LUDWIG, G. and MOLKENSTRUCK, W. *Calibration of an interferometric fiber tip sensor for ultrasound detection*. *Ultrasonics*, June 1997, vol. 35, iss. 4, p. 297-303
- [67] KOCH, C. and MOLKENSTRUCK, W. *Primary calibration of hydrophones with extended frequency range 1 to 70 MHz using optical interferometry*. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, September 1999, vol. 46, iss. 5, p. 1303-1314
- [68] WEBER, M. and WILKENS, V. *Using a heterodyne vibrometer in combination with pulse excitation for primary calibration of hydrophones in amplitude and phase*. *Metrologia*, 2017, vol. 54, p. 432-444
- [69] WEBER, M. and WILKENS, V. *A comparison of different calibration techniques for hydrophones used in medical ultrasonic field measurement*. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Contr.* 2021, vol. 68, no.5, p. 1919-1929
- [70] COOLING, M. P., HUMPHREY, V. F., and WILKENS, V. *Hydrophone area-averaging correction factors in nonlinearly generated ultrasonic beams*. *J. Phys. Conf. Ser.* 279, *Adv. Metrol. For Ultrasound in Med.*, 2011, 012002
- [71] REMBE, C., BODECKER, S., DRABENSTEDT, A., PUDEWILLS, F. and SIEGMUND, G. *Heterodyne laser-Doppler vibrometer with a slow-shear-mode Bragg cell for vibration measurements up to 1.2 GHz*. 8th Int. Conf. on Vibration Measurements by Laser Techniques, 2008, 7098, 70980A
- [72] WILKENS, V. and KOCH, C. *Amplitude and phase calibration of hydrophones up to 70 MHz using broadband pulse excitation and an optical reference hydrophone*. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004, vol. 115, p. 2892-2903
- [73] WINTER, M., FUSER, H., BIELER, M., SIEGMUND, G. and REMBE, C. *The problem of calibrating laser-Doppler vibrometers at high frequencies*. *AIP Conf. Proc.*, 2012, vol. 1457, p. 165–175
- [74] REMBE, C. and DRABENSTEDT, A. *Laser-scanning confocal vibrometer microscope: theory and experiments*. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, vol. 77, 083702
- [75] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML *Evaluation of Measurement Data – Supplement 2 to the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement Extension to Any Number of Output Quantities*, 2011, vol 102 (Sèvres: Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) Bureau International des Poids et Mesures (BIPM))
- [76] RAJAGOPAL, S., FURY, C.R., ZEQUIRI, B., BRANDT, M., WILKENS, V., KOCH, C., MATSUDA, Y., YOSHIOKA, M., PING, Y., YAN, Z., WENPING, B. COSTA-FELIX, R.P.B., OLIVEIRA, E.G. *Report on BIPM/CIPM key comparison CCAUV.U-K4: absolute calibration of medical hydrophones in the frequency range 0.5 MHz to 20 MHz*, *Metrologia*, 2016, vol. 53, 09004
- [77] RAJAGOPAL, S. and COX, T. *100 MHz bandwidth planar laser-generated ultrasound source for hydrophone calibration*. *Ultrasonics*, 2020, vol. 108, 106218
- [78] BACON, DR. *Primary calibration of ultrasonic hydrophone using optical interferometry*. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.* March 1988, vol. 35, iss. 2, p. 152-161

- [79] YANG, P., XING, G., and HE, L. *Calibration of high-frequency hydrophone up to 40 MHz by heterodyne interferometer*, Ultrasonics, 2014, vol. 54, no. 1, p. 402–407
- [80] MATSUDA, Y., YOSHIOKA, M., and UCHIDA, T., *Absolute hydrophone calibration to 40 MHz using ultrasonic far-field*, Mater. Trans., 2014, vol. 55, no. 7, p. 1030–1033
- [81] BACON, DR. and ROBINSON, SP. *Intercomparison of 1 mm hydrophone calibrations in the frequency range 0.5 to 15 MHz*. (Report EUR 13525 EN). Bureau Communautaire de Référence, Commission of the European Communities, 1991
- [82] ROBINSON, SP., BACON, DR. and MOSS, BC. *The measurement of the frequency response of a photodiode and amplifier using an opto-mechanical frequency response calibrator*. Meas. Sci. Technol., 1990, vol. 1, p. 1184–1187
- [83] ESWARD, TJ. and ROBINSON, SP. *Extending the frequency range of the National Physical Laboratory primary standard laser interferometer for hydrophone calibrations to 80 MHz*. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., May 1999, vol. 46, iss. 3, p. 737–744
- [84] PRESTON, RC., BACON, DR., LIVETT, AJ. and RAJENDRAN, K. *PVDF membrane hydrophone performance properties and their relevance to the measurement of the acoustic output of medical ultrasonic equipment*. J. Phys. E: Sci. Instrum., 1983, vol. 16, p. 786–796
- [85] SMITH, RA. and BACON, DR. *A multiple-frequency hydrophone calibration technique*. J. Acoust. Soc. Am., 1990, vol. 87, p. 2231–2243
- [86] BACON, DR. *Nonlinear acoustics in ultrasound calibration and standards*. In HAMILTON, MF. and BLACKSTOCK, DT., eds., *Frontiers of nonlinear acoustics*. 12th ISNA. Elsevier, 1990, p. 3–19
- [87] HARRIS, GR. and SHOMBERT, DG. *A pulsed near-field technique for measuring the directional characteristics of acoustic receivers*. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1985, vol. 32, no. 6, p. 802–808
- [88] LEWIN, PA. *Calibration and performance evaluation of miniature ultrasonic hydrophones using time delay spectrometry*. 1981 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 1981, p. 660–664
- [89] LUDWIG, G. and BRENDL, K. *Calibration of hydrophones based on reciprocity and time delay spectrometry*. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., March 1988, vol. 35, iss. 2, p. 168–174
- [90] WILKENS, V., SONNTAG, S. and WEBER, M. *Secondary complex-valued hydrophone calibration up to 100 MHz using broadband pulse excitation and a reference membrane hydrophone*. Proc. 2019 IEEE Ultrasonics Symposium, 2019, Glasgow, Scotland, (2019), WeH5.2
- [91] SELFRIDGE, A. and LEWIN, PA. *Wideband Spherically Focused PVDF Acoustic Sources for Calibration of Ultrasound Hydrophone Probes*. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., November 2000, vol. 47, iss. 6, p. 1372–1376
- [92] HARRIS, GR., CAROME, EF. and DARDY, HD. *An analysis of pulsed ultrasonic fields as measured by PVDF spot-poled membrane hydrophones*. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, September 1983, vol. SU-30, no. 5, p. 295–303

- [93] BABOUX, JC., LAKESTANI, F. and PERDRIX, M. *Theoretical and experimental study of the contribution of radial modes to the pulsed ultrasonic field radiated by a thick piezoelectric disk*. J. Acoust. Soc. Am., 1984, vol. 75, p. 1722-1731
- [94] HEYSER, RC. *Acoustical measurements by time delay spectrometry*. J. Audio Eng. Soc., 1967, vol. 15, p. 370
- [95] CHIVERS, RC. *Time-delay spectrometry for ultrasonic transducer characterization*. J. Phys. E. Sci. Instrum., 1986, vol. 19, p. 834-843
- [96] KOCH, C. *Amplitude and Phase Calibration of Hydrophones by Heterodyne and Time-gated Time-delay Spectrometry*. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., March 2003, vol. 50, iss. 3, p. 344-348
- [97] GAMMELL, PM. *Time and frequency domain measurements of materials with high ultrasonic attenuation using time domain spectroscopy*. In THOMPSON, DO. and CHIMENTI, DE., eds, Review of Progress in Quantitative NDE. Plenum Press, 1986, vol. 5, p. 759-656
- [98] LEWIN, PA. *Miniature piezoelectric polymer ultrasonic hydrophone probes*. Ultrasonics, September 1981, vol. 19, iss. 5, p. 213-216
- [99] LEWIN, PA. and SCHAFER, ME. *Ultrasonic probes in measurement practice*. Medical Device and Diagnostic Industry, 1986, vol. 8, no. 5, p. 40-45
- [100] HURRELL, A. *Voltage to pressure conversion: Are you getting 'phased' by the problem*. J. Phys. Conf. Ser., 2004, vol.1, iss. 1, p. 57-62
- [101] WEAR K., GAMMELL P., MARUYADA S., LIU Y., and HARRIS G. *Time-delay spectrometry measurement of magnitude and phase of hydrophone response*. IEEE Trans UFFC. 11/2011; 58(11):2325-33
- [102] BLOOMFIELD P., GANDHI G., and LEWIN P. *Membrane hydrophone phase characteristics through nonlinear acoustics measurements*. IEEE Trans UFFC. 11/2011; 58(11):2418-37
- [103] BLOOMFIELD P., GANDHI G., and LEWIN P. *Nonlinear acoustics determination of phase characteristics of PVDF membrane hydrophones*. J. Phys: Conf. Ser. 279 012001
- [104] WILKENS, V. *Characterization of an optical multilayer hydrophone with constant frequency response in the range from 1 to 75 MHz*. J. Acoust. Soc. Am., 2003, vol. 113, p. 1431-38
- [105] WILKENS, V. and KOCH, C. *Optical multilayer detection array for fast ultrasonic field mapping*. Opt. Lett., 1999, vol. 24, no. 15, p. 1026-1028
- [106] EICHSTAEDT, S. and WILKENS, V. *GUM2DFT – A software tool for uncertainty evaluation of transient signals in the frequency domain*. Meas. Sci. Technol., 2016, vol. 27, no. 5, 055001-1-055001-12
- [107] HUMPHREY, VF., COOLING, MP., DUNCAN, TM. and DUCK, F. *Measurement of the phase response of a membrane hydrophone and its application to ultrasonic field characterisation*. Advanced Metrology for Ultrasound in Medicine (AMUM) conference, Teddington, UK, 27-28 April 2004

- [108] HUMPHREY, VF., COOLING, MP. *A nonlinear propagation model-based phase calibration technique for membrane hydrophones*. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., January 2008, vol. 55, iss. 1, p. 84-93
- [109] ZEQRIRI, B. and BOND, AD. *The influence of waveform distortion on hydrophone spatial-averaging corrections – Theory and measurement*. J. Acoust. Soc. Am., 1992, vol. 92, p. 1809-1821
- [110] DU, G. and BREAZEALE, MA. *Harmonic distortion of a finite amplitude Gaussian beam in a fluid*. J. Acoust. Soc. Am., 1986, vol. 80, p. 212-216
- [111] BRENDDEL, K., LUDWIG, G. *Measurement of Ultrasonic Diffraction Loss for Circular Transducers*. Acustica, 1975, vol. 32, p.110
- [112] BEISSNER, K. *Free-field Reciprocity Calibration in the Transition Range between Near Field and Far Field*. Acustica, 1980, vol. 46, p.162
- [113] FAY, B. *Numerische Berechnung der Beugungsverluste im Schallfeld von Ultraschallwandlern*. Acustica, 1976, vol. 36, p. 209
- [114] KHIMUNIN, A.S. *Numerical Calculation of the Diffraction Corrections for the Precise Measurement of Ultrasound Absorption*. Acustica, 1972, vol. 27, p. 173
- [115] BEISSNER, K. *Exact integral expression for the diffraction loss of a circular piston source*. Acustica, 1981, vol. 49, p. 212
- [116] YOSHIOKA, SATO, KIKUCHI and MATSUDA. *Influence of ultrasonic nonlinear propagation on hydrophone calibration using two-transducer reciprocity method*. Jpn. J. App. Phys., 2006, vol. 45, No.5B, p.4547-4549
- [117] PINKERTON, J.M.M. *A Pulse Method for the Measurement of Ultrasonic Absorption in Liquids Results for Water*. Nature, 1947, vol. 160, p. 128
- [118] BILANIUK, N, WONG, G.S.K. *Erratum: Speed of sound in pure water as a function of temperature*, J. Acoust. Soc. Am., 1996, vol. 99, no. 5, p. 3257
- [119] LUBBERS, J, GRAAFF, R. *A simple and accurate formula for the sound velocity in water*, Ultrasound Med. Biol., 1998, vol 24, no. 7, p. 1065-1068
- [120] BELOGOL'SKII, V.A., SEKOYAN, S.S., SAMORUKOVA, L.M. STEFANOV, S.R., Levitsov, V.I. *Pressure dependence of the sound velocity in distilled water*, Measurement Techniques, 1999, vol. 42, no. 4, p. 406-413
- [121] IEC TS 62903, *Ultrasonics – Measurements of electroacoustical parameters and acoustic output power of spherically curved transducers using the self-reciprocity method*
- [122] SHOU, W., DUAN, S., HE, P., XIA, R. and QIAN, D. *Calibration of a focusing transducer and miniature hydrophone as well as acoustic power measurement based on free-field reciprocity in a spherically focused field*, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., 2006, vol. 53, no.3, p. 564-570
- [123] LONGYANG, J., SHOU, W. and HU, B. *Reciprocity calibration of hydrophones in high intensity focused ultrasound field*, American Journal of Physics and Applications, 2020, vol. 8, no.2, p. 19-24

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62127-2:2025

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	122
INTRODUCTION.....	124
1 Domaine d'application	125
2 Références normatives	125
3 Termes et définitions	126
4 Liste des symboles	135
5 Vue d'ensemble des procédures d'étalonnage	139
5.1 Principes.....	139
5.2 Récapitulatif des procédures d'étalonnage	140
5.3 Consignation des résultats.....	141
5.4 Périodes d'étalonnage recommandées.....	143
6 Exigences génériques d'un système d'étalonnage d'hydrophone	143
6.1 Positionnement mécanique	143
6.1.1 Généralités	143
6.1.2 Exactitude de la position axiale de l'hydrophone	143
6.1.3 Exactitude de la position latérale de l'hydrophone	144
6.2 Mesurages et stabilité de la température.....	144
6.3 Taille de l'hydrophone	144
6.4 Récipient de mesure et propriétés de l'eau	145
6.5 Mesurage de la tension de sortie	145
7 Considérations électriques	146
7.1 Type de signal	146
7.2 Mise à la terre.....	146
7.3 Mesurage de la tension de sortie de l'hydrophone.....	146
7.3.1 Généralités	146
7.3.2 Charge électrique par appareil de mesure	146
7.3.3 Charge électrique par câbles d'extension.....	147
7.3.4 Bruit	147
7.3.5 Diaphonie (capteur de radiofréquence) et interférence acoustique	147
7.3.6 Préamplificateurs d'hydrophone intégrés	147
8 Préparation des hydrophones	148
8.1 Généralités	148
8.2 Mouillage	148
8.3 Support de l'hydrophone	148
8.4 Influence du câble.....	148
9 Étalonnage par réciprocité en champ libre	148
9.1 Généralités	148
9.2 Objet.....	148
9.3 Principes généraux	149
9.3.1 Généralités	149
9.3.2 Méthode d'étalonnage par réciprocité à trois transducteurs	149
9.3.3 Méthode d'étalonnage par autoréciprocité	149
9.3.4 Méthode d'étalonnage par réciprocité à deux transducteurs.....	149
9.4 Méthode d'étalonnage par réciprocité à deux transducteurs	149
9.4.1 Généralités	149
9.4.2 Transducteurs auxiliaires.....	150

9.4.3	Réflecteur.....	150
9.4.4	Champ de mesure	151
9.4.5	Approche réciproque	151
9.4.6	Procédure de mesure	151
10	Étalonnage en champ libre par balayage planaire.....	151
10.1	Généralités	151
10.2	Objet.....	151
10.3	Principe général.....	151
10.4	Exigences de procédure.....	154
10.4.1	Balayage de l'hydrophone.....	154
10.4.2	Mesurage de la puissance	154
10.4.3	Montage du transducteur	154
10.4.4	Conditions de mesure	154
10.4.5	Mesurages.....	155
10.5	Corrections et sources d'incertitude	155
11	Étalonnage en champ libre par interférométrie optique	155
11.1	Généralités	155
11.2	Principe	155
12	Étalonnage par comparaison à l'aide d'un hydrophone normalisé	155
12.1	Généralités	155
12.2	Objet.....	156
12.3	Principe	156
12.4	Exigences de procédure.....	156
12.4.1	Transducteur source	156
12.4.2	Signal d'entraînement du transducteur source	157
12.4.3	Système de mesure	157
12.5	Procédure	157
12.5.1	Mesurages (Type I): détermination de la réponse directionnelle d'un hydrophone	157
12.5.2	Mesurages (Type II): étalonnage par comparaison à l'aide d'un hydrophone normalisé	158
12.6	Taille maximale de l'hydrophone	158
Annexe A (informative)	Évaluation de l'incertitude dans l'étalonnage en champ libre des hydrophones	159
A.1	Généralités	159
A.2	Incertitude (élargie) globale	159
A.3	Sources communes d'incertitude.....	159
Annexe B (informative)	Comportement des capteurs polymères PVDF dans les champs ultrasoniques à haute intensité	161
B.1	Généralités	161
B.2	Contexte théorique.....	161
B.3	Essais.....	162
B.4	Résultats	163
B.5	Conclusions	164
Annexe C (informative)	Corrections de charge électrique.....	165
C.1	Généralités	165
C.2	Corrections à l'aide de l'impédance complexe	165
C.3	Corrections à l'aide des capacités électriques uniquement.....	166

Annexe D (informative) Étalonnage absolu des hydrophones à l'aide de la technique de balayage planaire.....	167
D.1 Vue d'ensemble	167
D.2 Méthodologie de balayage de l'hydrophone.....	167
D.3 Corrections et sources d'incertitude de mesure	168
D.3.1 Puissance totale	168
D.3.2 Signal reçu de l'hydrophone.....	169
D.3.3 Intégration	169
D.3.4 Réponse directionnelle	170
D.3.5 Taille finie de l'hydrophone	170
D.3.6 Bruit	170
D.3.7 Propagation non linéaire.....	171
D.3.8 Balayage planaire.....	172
D.3.9 Intensité proportionnelle à la pression au carré.....	173
D.4 Justification concernant la technique de balayage planaire pour l'étalonnage des hydrophones	173
D.4.1 Généralités.....	173
D.4.2 Relation entre les rayons efficaces de l'hydrophone et du transducteur	173
D.4.3 Justification pour $a_t / l \leq 0,5$	174
D.4.4 Écart de la Formule (D.2)	174
D.4.5 Effet de la propagation non linéaire, D.3.7	175
Annexe E (informative) Propriétés de l'eau	177
E.1 Généralités	177
E.2 Coefficient d'atténuation pour la propagation dans l'eau.....	178
Annexe F (informative) Étalonnage absolu des hydrophones par interférométrie optique	179
F.1 Vue d'ensemble	179
F.2 Position actuelle	179
F.2.1 Méthode reposant sur la propagation "magnétique" ou non linéaire	179
F.2.2 Interférométrie optique	180
F.2.3 Mises en œuvre à haute fréquence de l'interférométrie optique	181
Annexe G (informative) Concepts de forme d'onde	196
G.1 Vue d'ensemble	196
G.2 Forme d'onde temporelle, concepts de fréquence et positionnement de l'hydrophone pour des étalonnages par comparaison des hydrophones	196
G.3 Concepts de forme d'onde temporelle et de fréquences couvertes	197
G.3.1 Utilisation d'une salve d'impulsion à bande étroite (concept a).....	197
G.3.2 Utilisation d'une forme d'onde à large bande résultant d'une salve d'impulsion à bande étroite après propagation non linéaire (concept b)	198
G.3.3 Utilisation d'une impulsion à large bande (concept c).....	198
G.3.4 Utilisation d'un balayage de fréquence à ondes entretenues avec la spectrométrie de temporisation (concept d)	199
G.3.5 Balayage de fréquence à ondes entretenues avec analyse de fréquence par portillonnage temporel (concept e).....	199
G.4 Concepts de position de l'hydrophone.....	199
G.4.1 Position de l'hydrophone de champ proche (concept A).....	199
G.4.2 Position de l'hydrophone de champ lointain (concept B)	200
G.4.3 Position de l'hydrophone de champ lointain avec référence particulière à un long trajet de propagation afin d'obtenir une déformation non linéaire (concept C).....	200

G.4.4	Position focale géométrique sphérique avec transducteur source à focalisation (excitation à basse tension ou linéaire) (concept D)	200
G.4.5	Position focale géométrique sphérique avec transducteur source à focalisation et excitation à tension élevée afin d'obtenir une déformation non linéaire (concept E).....	201
G.5	Considérations particulières liées aux étalonnages réalisés à proximité de la face d'un transducteur	201
G.5.1	Exigence générale	201
G.5.2	Influence des ondes de bord.....	201
G.5.3	Influence potentielle des ondes réfractées	202
G.5.4	Traitement des ondes réfractées proches du transducteur	203
G.5.5	Indications sur la région d'onde plane paraxiale utilisable dans le cas d'une position de l'hydrophone de champ proche, en prenant en considération tant les contributions de l'onde de bord que celles de l'onde réfractée.....	205
Annexe H (informative) Spectrométrie de temporisation – Exigences et bref examen de la technique		206
H.1	Généralités	206
H.2	Évaluation de l'étalonnage et des performances des hydrophones à ultrasons à l'aide de la spectrométrie de temporisation.....	206
H.2.1	Paramètre du champ ultrasonique mesuré	206
H.2.2	Plage de fréquences ultrasonores dans laquelle la technique est applicable.....	206
H.2.3	Configuration du champ ultrasonique pour lequel la technique est applicable	206
H.2.4	Résolution spatiale	207
H.2.5	Sensibilité de la technique	207
H.2.6	Plage de mesure de la sensibilité	207
H.2.7	Reproductibilité	207
H.2.8	Réponse impulsionnelle.....	207
H.2.9	Procédure de réalisation des mesurages	207
H.3	Procédure de mesure pour intercomparaison de sensibilité.....	208
H.4	Procédure de mesure (étalonnage par réciprocité).....	208
H.5	Limitations	208
Annexe I (informative) Détermination de la réponse en phase des hydrophones		209
I.1	Vue d'ensemble	209
I.2	Spectrométrie de temporisation cohérente	210
I.2.1	Principe de fonctionnement	210
I.2.2	Exemple de résultats	210
I.2.3	Incertitudes.....	211
I.2.4	Limitations	212
I.3	Technique d'étalonnage par impulsion avec hydrophone multicouche optique.....	212
I.3.1	Principe de fonctionnement	212
I.3.2	Exemple de résultats	212
I.3.3	Incertitudes.....	213
I.3.4	Limitations	213
I.4	Modélisation de la propagation non linéaire des impulsions	214
I.4.1	Principe de fonctionnement	214
I.4.2	Limitations	214
Annexe J (informative) Considérations liées à la taille maximale de l'élément actif d'un hydrophone.....		215

J.1	Taille maximale de l'hydrophone dans le cas du champ proche (Annexe G – Concept A de position de l'hydrophone)	215
J.2	Taille maximale de l'hydrophone dans le cas du champ lointain (Annexe G – Concept B de position de l'hydrophone)	215
J.3	Taille maximale de l'hydrophone dans le cas d'un champ lointain avec référence particulière à un long trajet de propagation afin d'obtenir une déformation non linéaire (Annexe G – Concept C de position de l'hydrophone)	215
Annexe K	(informative) Méthode d'étalonnage par réciprocité à deux transducteurs	218
K.1	Généralités	218
K.2	Principes fondamentaux de la réciprocité	218
K.3	Grandeurs électriques	219
K.4	Correction de la diffraction et perte due à la propagation sonore non linéaire	220
K.5	Champ ultrasonique	220
K.6	Montage expérimental	221
K.6.1	Généralités	221
K.6.2	Réflecteur pivotant	221
K.6.3	Réflecteur translationnel	222
K.6.4	Transducteur auxiliaire translationnel	222
K.7	Étalonnage d'un hydrophone à l'aide d'un transducteur auxiliaire étalonné à courbure sphérique fondé sur la méthode par autorécaprocité	223
Bibliographie		227
Figure F.1	– Montage expérimental de la technique de la feuille interférométrique	182
Figure F.2	– Niveau de sensibilité en circuit ouvert en bout de câble, L_{Mc} , d'un hydrophone à membrane coplanaire	184
Figure F.3	– Montage expérimental de la technique du vibromètre hétérodyne	186
Figure F.4	– Profils radiaux mesurés dépendant de la fréquence du champ d'impulsions acoustiques	188
Figure F.5	– Correction de la moyenne spatiale déterminée expérimentalement en fonction de la fréquence pour des hydrophones de différents diamètres d'éléments efficaces, d_{eff}	189
Figure F.6	– Niveau de sensibilité en bout de câble et phase de sensibilité d'un ensemble d'hydrophones à membrane coplanaire avec une terminaison de 50 Ω	190
Figure F.7	– Forme d'onde d'hydrophone générée par un hydrophone à membrane coplanaire de 9 m placé au foyer d'un transducteur de 5 MHz (longueur focale de 51 mm)	191
Figure F.8	– Forme d'onde de déplacement de l'interféromètre générée avec la pellicule placée au foyer du transducteur de 5 MHz (position focale de 51 mm)	192
Figure F.9	– Spectre de fréquences de la forme d'onde de déplacement (courbe inférieure) et forme d'onde de déplacement différenciée (courbe supérieure)	192
Figure F.10	– Sensibilité du diamètre d'un élément actif de 0,2 mm d'un hydrophone à membrane à deux feuilles de 9 m déterminée à intervalles de 5 MHz dans la plage de fréquences comprise entre 5 MHz et 60 MHz	193
Figure G.1	– Coordonnées d'un point du champ, P, dans le champ proche d'un transducteur source circulaire plan de rayon a_t	203
Figure I.1	– Phase de la sensibilité en circuit ouvert en bout de câble de deux hydrophones à membrane	211
Figure I.2	– Phase de la sensibilité en circuit ouvert en bout de câble d'un hydrophone à aiguille de 0,2 mm de diamètre	213

Figure K.1 – Montage expérimental avec un réflecteur pivotant [22].....	222
Figure K.2 – Montage expérimental avec un réflecteur translationnel [23]	222
Figure K.3 – Montage expérimental avec un transducteur auxiliaire translationnel [24]	223
Figure K.4 – Relation de G_c et $\theta_m(^{\circ})$ pour plusieurs valeurs de ka_h	225
Tableau 1 – Liste des valeurs d'incertitude types (pour une couverture à 95 %) obtenues par les méthodes d'étalonnage spécifiées dans le présent document et pour la plage de fréquences indiquée	141
Tableau E.1 – Vitesse du son c [54],[55] et impédance acoustique spécifique ρc , en fonction de la température, pour la propagation dans l'eau	177
Tableau G.1 – Concepts de forme d'onde temporelle et de position de l'hydrophone décrits dans l'Annexe G	196
Tableau I.1 – Exemple d'incertitudes (où un facteur d'élargissement $k = 2$ est utilisé) dans le cas de l'étalonnage de phase HTDS d'un hydrophone à aiguille de 0,2 mm de diamètre, exprimé à un niveau de confiance de 95 %.....	211
Tableau K.1 – Valeurs du coefficient de correction $G_c(ka_h, \theta_m)$ pour l'effet de la moyenne spatiale de la pression acoustique de champ libre sur la surface de l'hydrophone en cas de retrait de ce dernier	225

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ULTRASONS – HYDROPHONES –

Partie 2: Étalonnage des champs ultrasoniques

AVANT-PROPOS

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

L'IEC 62127-2 a été établie par le comité d'études 87 de l'IEC: Ultrasons. Il s'agit d'une Norme internationale.

Cette seconde édition annule et remplace la première édition parue en 2007, l'Amendement 1:2013 et l'Amendement 2:2017. Cette édition constitue une révision technique.

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

- a) la limite de fréquence supérieure de 40 MHz a été supprimée;
- b) les définitions de la sensibilité de l'hydrophone ont été modifiées afin de reconnaître les sensibilités comme des grandeurs à valeur complexe;
- c) les procédures de mesure de la réponse directionnelle et de détermination de la taille efficace ont été mises à jour au 12.5.1 pour s'aligner sur les modifications récentes de l'IEC 62127-3;
- d) l'Annexe F a été modifiée pour inclure une technique d'étalonnage pour l'étalonnage à haute fréquence à valeurs complexes;
- e) la description de la méthode par réciprocité de l'Annexe K a été élargie pour comprendre également les transducteurs à focalisation.

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

Projet	Rapport de vote
87/878/FDIS	87/884/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 développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/publications.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62127, publiées sous le titre général *Ultrasons – Hydrophones*, se trouve sur le site web de l'IEC.

NOTE Les termes en **gras** dans le texte sont définis à l'Article 3.

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. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé, ou
- révisé

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

INTRODUCTION

La répartition spatiale et temporelle de la pression acoustique d'un champ ultrasonique en milieu liquide est généralement déterminée à l'aide d'**hydrophones** à ultrasons miniatures. Ces dispositifs ne sont pas des appareils de mesure à proprement parler et il est important qu'ils soient étalonnés. La présente partie de l'IEC 62127 spécifie les méthodes d'étalonnage à utiliser pour déterminer la réponse d'un **hydrophone** dans la plage ultrasonore, c'est-à-dire au-dessus de 50 kHz. Dans ce contexte, la principale application de l'**hydrophone** consiste à mesurer les champs ultrasoniques émis par des appareils de diagnostic médical dans l'eau. Il est important de comprendre le comportement de l'**hydrophone** dans cette large bande de fréquences afin de caractériser de manière fiable les paramètres acoustiques du champ acoustique appliqué. En particulier, la plage de fréquences au-dessus de 15 MHz est importante pour caractériser cet appareil de manière exhaustive, principalement en raison de la présence accrue de composants à haute fréquence dans les signaux ultrasonores provoqués par une propagation non linéaire. En outre, les systèmes médicaux à ultrasons qui utilisent des fréquences supérieures à 15 MHz sont de plus en plus nombreux, notamment les sondes périopératoires. Ces dernières années, il est apparu que la réponse d'un **hydrophone** inférieure à 0,5 MHz était également importante afin de déterminer avec fiabilité la pression acoustique négative (de raréfaction) de crête.

Si le terme "**hydrophone**" peut être utilisé dans un sens plus large, il fait référence ici aux **hydrophones** piézoélectriques miniatures. Il s'agit du type d'appareil utilisé aujourd'hui dans différents domaines des ultrasons médicaux et, en particulier, pour caractériser de manière quantitative la structure du champ des appareils de diagnostic médicaux [1]¹. Concernant les autres types de capteurs de pression, comme les capteurs fibroniques, certaines exigences du présent document s'appliquent à des capteurs particuliers seulement. Si, à l'avenir, ces autres types d'"**hydrophones**" prennent de l'importance dans la pratique de mesure sur le terrain, leurs caractéristiques et leur étalonnage seront traités dans une future édition de l'IEC 62127-2 ou dans une partie distincte de l'IEC 62127.

NOTE 1 Le présent document porte sur la plage de fréquences ultrasonores comprise entre 50 kHz et une fréquence supérieure de 100 MHz. Toutes les techniques décrites ne sont pas applicables à l'ensemble de la plage de fréquences. Les normes qui traitent des propriétés de l'**hydrophone** (IEC 62127-3) et de l'utilisation de l'**hydrophone** (IEC 62127-1) font l'objet d'une maintenance en parallèle. Cette maintenance conduira finalement à des normes unifiées qui couvrent l'ensemble du domaine d'application pratique de l'**hydrophone**.

NOTE 2 L'étalonnage des **hydrophones** dans la plage de fréquences ultrasonores inférieures et dans la plage de fréquences acoustiques sous-marines est spécifiquement traité dans la série IEC 60565 [2],[3].

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

ULTRASONS – HYDROPHONES –

Partie 2: Étalonnage des champs ultrasoniques

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62127 spécifie:

- les méthodes d'étalonnage absolues de l'**hydrophone**;
- les méthodes d'étalonnage (comparatives) relatives de l'**hydrophone**.

Des recommandations et des références à des documents validés sont indiquées pour les différentes méthodes d'étalonnage relatif et absolu dans la plage de fréquences couverte par le présent document.

Le présent document s'applique:

- aux **hydrophones** utilisés pour des mesurages réalisés dans l'eau et dans la plage de fréquences ultrasonores comprise entre 50 kHz et 100 MHz;

NOTE 1 Bien que certaines applications médicales des ultrasons utilisées en physiothérapie et qui fonctionnent dans la plage de fréquences comprise entre 40 kHz et 100 kHz soient en cours de développement, la plage de fréquences principale des appareils d'imagerie de diagnostic reste supérieure à 2 MHz. Il a récemment été établi que, même dans ce dernier cas, la réponse de l'**hydrophone** à des fréquences sensiblement inférieures peut avoir une influence sur les mesurages des paramètres acoustiques fondamentaux [4].

NOTE 2 Les méthodes d'étalonnage des **hydrophones** acoustiques sous-marins applicables dans la plage de fréquences comprise entre 200 Hz et 1 MHz sont disponibles dans l'IEC 60565-1 [2], et pour les fréquences de 0,01 Hz à plusieurs kHz dans l'IEC 60565-2 [3].

- aux **hydrophones** qui utilisent des capteurs piézoélectriques, conçus pour mesurer les champs ultrasoniques à ondes pulsées et entretenues, générés par les équipements à ultrasons;

NOTE 3 Certains **hydrophones** peuvent comporter des éléments actifs non circulaires par suite de légers écarts de la structure circulaire provoqués, par exemple, par une structure à électrode. À l'inverse, les éléments actifs peuvent s'avérer être carrés. Dans ces cas, il est important d'accorder une attention particulière à la **réponse directionnelle** et aux rayons efficaces de l'élément actif qui passe par différents axes de rotation.

- aux **hydrophones** avec ou sans préamplificateur d'**hydrophone**.

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 61161, *Ultrasons – Mesurage de puissance – Balances de forces de rayonnement et exigences de fonctionnement*

IEC 61689, *Ultrasons – Systèmes de physiothérapie – Spécifications des champs et méthodes de mesure dans la plage de fréquences de 0,5 MHz à 5 MHz*

IEC 62127-1, *Ultrasons – Hydrophones – Partie 1: Mesurage et caractérisation des champs ultrasoniques médicaux*

IEC 62127-3:2022, *Ultrasons – Hydrophones – Partie 3: Propriétés des hydrophones pour les champs ultrasoniques*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC 62127-1, de l'IEC 62127-3 ainsi que les suivants s'appliquent.

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

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

3.1

centre acoustique

point d'un transducteur ou à proximité de celui-ci à partir duquel les ondes sonores divergentes sphériques émises par le transducteur, et observables en des points distants, divergent

Note 1 à l'article: Ce point correspond à la limite entre le **champ proche** et le **champ lointain**.

Note 2 à l'article: Dans cette région, le champ acoustique comporte des fronts d'ondes planes qui évoluent en fronts d'ondes sphériques sous l'effet de la divergence.

3.2

axe du faisceau

ligne droite qui passe par les **points centraux du faisceau** de deux plans perpendiculaires à la droite associant le point de l'**intégrale de pression d'impulsion au carré** maximum au centre de la **surface du transducteur externe**

Note 1 à l'article: L'emplacement du premier plan est celui du plan qui contient l'**intégrale de pression d'impulsion au carré** maximum ou, alternativement, celui qui contient un seul lobe principal qui se trouve dans la zone Fraunhofer focale. L'emplacement du second plan est, dans la mesure du possible, issu du premier plan et parallèle au premier avec les deux mêmes lignes d'exploration orthogonales (axes x et y) utilisées pour le premier plan.

Note 2 à l'article: Dans un certain nombre de cas, l'expression **intégrale de pression d'impulsion au carré** est remplacée dans la définition ci-dessus par une grandeur associée de manière linéaire, par exemple:

- a) dans le cas d'un signal à ondes entretenues, l'expression **intégrale de pression d'impulsion au carré** est remplacée par la pression acoustique moyenne au carré telle que définie dans l'IEC 61689;
- b) si la synchronisation du signal avec cadre de balayage n'est pas disponible, l'expression **intégrale de pression d'impulsion au carré** peut être remplacée par l'**intensité dérivée de la moyenne temporelle**.

Note 3 à l'article: Voir l'IEC 62127-1:2022, Figure 1.

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.8, modifié – Dans la définition, "l'ouverture" a été remplacé par "la surface".]

3.3

point central du faisceau

position déterminée par l'intersection de deux lignes dans le même plan de la surface du faisceau xy passant par les **points médians de largeur de faisceau** des deux plans orthogonaux, xz et yz , perpendiculaires à leurs lignes de **largeur de faisceau** respectives

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.9]

3.4

largeur de faisceau

w_6 , w_{12} , w_{20}

distance la plus importante entre deux points d'un axe spécifié perpendiculaire à l'**axe du faisceau**, dans laquelle l'**intégrale de pression d'impulsion au carré** est inférieure à sa valeur maximale sur l'axe spécifié par une quantité donnée

Note 1 à l'article: Dans un certain nombre de cas, l'expression **intégrale de pression d'impulsion au carré** est remplacée dans la définition ci-dessus par une grandeur associée de manière linéaire, par exemple:

- a) dans le cas d'un signal à ondes entretenues, l'expression **intégrale de pression d'impulsion au carré** est remplacée par la pression acoustique moyenne au carré telle que définie dans l'IEC 61689;
- b) si la synchronisation du signal avec cadre de balayage n'est pas disponible, l'expression **intégrale de pression d'impulsion au carré** peut être remplacée par l'**intensité dérivée de la moyenne temporelle**.

Note 2 à l'article: Les **largeurs de faisceau** communément utilisées sont spécifiées à des niveaux –6 dB, –12 dB et –20 dB en dessous de la valeur maximale. Le calcul de décibel implique l'utilisation de 10 fois le logarithme des rapports des intégrales.

Note 3 à l'article: La **largeur de faisceau** est exprimée en mètres (m).

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.11]

3.5

point médian de largeur de faisceau

moyenne linéaire de la position des centres de **largeur de faisceau** dans un plan

Note 1 à l'article: La moyenne est prise en considération pour un certain nombre de niveaux de **largeurs de faisceau** (indiqué dans l'IEC 61828:2020, Article C.2 et Tableau C.2).

[SOURCE: IEC 61828:2020 [5], 3.22]

3.6

centre du faisceau

point d'un plan dans le **champ lointain**, généralement perpendiculaire à l'**axe du faisceau**, auquel la **pression acoustique à la crête spatiale et temporelle** se produit

3.7

intensité instantanée dérivée

quotient de la **pression acoustique instantanée** au carré et impédance acoustique caractéristique du milieu à un instant donné à un point donné d'un champ acoustique

$$I(t) = \frac{p(t)^2}{\rho c} \quad (1)$$

où:

$p(t)$ est la **pression acoustique instantanée**;

ρ est la densité du milieu;

c est la vitesse du son dans le milieu

Note 1 à l'article: Pour les besoins des mesurages auxquels fait référence le présent document, l'**intensité instantanée dérivée** est une approximation de l'**intensité instantanée**.

Note 2 à l'article: Il est prévu de prendre en compte l'**incertitude** augmentée pour les mesurages très proches du transducteur.

Note 3 à l'article: L'**intensité instantanée dérivée** est exprimée en unités de watt par mètre carré (W/m²).

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.14]

3.8

balayage diamétral de faisceau

ensemble de mesurages de la tension de sortie de l'**hydrophone** réalisés lors du déplacement de l'**hydrophone** dans une ligne droite qui passe par un point de l'**axe du faisceau** et dans une direction perpendiculaire à l'**axe du faisceau**

Note 1 à l'article: Le **balayage diamétral de faisceau** peut être étendu à différentes distances sur l'un ou l'autre des côtés de l'**axe du faisceau**.

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.15]

3.9

réponse directionnelle

description de la réponse d'un **hydrophone**, en fonction de la direction de propagation de l'onde sonore incidente plane, dans un plan spécifié qui passe par le **centre de référence** et à une fréquence spécifiée

Note 1 à l'article: Même si la **réponse directionnelle** est une fonction à valeur complexe, le module de la **réponse directionnelle** est généralement plus significatif et est couramment représenté sous forme graphique.

[SOURCE: IEC 62127-3:2022, 3.2]

3.10

taille efficace de l'hydrophone

a_h

dimension d'un **hydrophone** de récepteur théorique qui comporte une fonction de **réponse directionnelle** prévue à angle d'ouverture égal à l'angle d'ouverture observé

Note 1 à l'article: D'une manière générale, la taille dépend de la fréquence. Pour obtenir des données expérimentales représentatives, voir [9].

Note 2 à l'article: La **taille efficace de l'hydrophone** est exprimée en mètres (m).

Note 3 à l'article: Pour les **hydrophones** de géométrie circulaire, la **taille efficace de l'hydrophone** est un rayon.

Note 4 à l'article: Pour les **hydrophones** de géométrie rectangulaire, la **taille efficace de l'hydrophone** est la moitié de la valeur la plus élevée de la longueur ou de la largeur.

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.20]

3.11

rayon efficace d'un transducteur ultrasonique sans focalisation

a_t

rayon d'un transducteur ultrasonique semblable à un piston à disque parfait qui présente une distribution de la pression acoustique axiale prévue pratiquement équivalente à celle observée sur une distance axiale tant que le dernier maximum axial au moins n'est pas passé

Note 1 à l'article: Le **rayon efficace d'un transducteur ultrasonique sans focalisation** est exprimé en mètres (m).

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.21]

3.12

longueur d'onde effective

λ_{eff}

vitesse du son longitudinale dans le milieu de propagation divisée par la fréquence d'application acoustique

Note 1 à l'article: La **longueur d'onde effective** est exprimée en mètres (m).

Note 2 à l'article: Les définitions de la fréquence d'application acoustique qui dépendent de l'application sont données dans l'IEC 62127-1:2022.

[SOURCE: IEC 61828:2020 [5], 3.46, modifié – La Note 2 à l'article a été ajoutée.]

3.13**impédance de charge électrique** $\underline{Z}_L$

impédance d'entrée électrique complexe (composée d'une partie réelle et d'une partie imaginaire) à laquelle le câble de sortie de l'**hydrophone** est ou est destiné à être connecté

Note 1 à l'article: L'**impédance de charge électrique** est exprimée en ohms (Ω).

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.22]

3.14**sensibilité en bout de câble** $\underline{M}_L(f)$

<d'un **hydrophone** ou d'un **ensemble d'hydrophones**> quotient de la transformée de Fourier du signal tension-temps de l'**hydrophone** $F(u_L(t))$ à l'extrémité de tout câble intégré ou connecteur de sortie d'un **hydrophone** ou d'un **ensemble d'hydrophones**, lorsqu'il est connecté à une **impédance de charge électrique** spécifiée, et de la transformée de Fourier $F(p(t))$ de la **forme d'onde des impulsions acoustiques** dans le **champ libre** non perturbé d'une onde plane à la position du **centre de référence** de l'**hydrophone** si l'**hydrophone** a été retiré

$$\underline{M}_L(f) = \frac{F(u_L(t))}{F(p(t))} \quad (2)$$

Note 1 à l'article: La **sensibilité en bout de câble** est un paramètre à valeurs complexes. Son module est exprimé en unités de volts par pascal (V/Pa). Son angle de phase est exprimé en degrés et représente la différence de phase entre la tension électrique et la pression acoustique.

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.25]

3.15**niveau de sensibilité en bout de câble** $L_{M_L}(f)$

<d'un **hydrophone** ou d'un **ensemble d'hydrophones**> vingt fois le logarithme en base 10 du quotient du module de la **sensibilité en bout de câble** $|\underline{M}_L(f)|$ et d'une sensibilité de référence M_{ref}

$$L_{M_L}(f) = 20 \log_{10} \frac{|\underline{M}_L(f)|}{M_{ref}} \text{ dB} \quad (3)$$

Note 1 à l'article: Les valeurs couramment utilisées de la sensibilité de référence M_{ref} sont 1 V/ μ Pa ou 1V/Pa.

Note 2 à l'article: Le **niveau de sensibilité en bout de câble** est exprimé en décibels (dB).

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.26]

3.16

sensibilité en circuit ouvert en bout de câble

$\underline{M}_c(f)$

<d'un **hydrophone**> quotient de la transformée de Fourier du signal tension-temps en circuit ouvert de l'**hydrophone** $F(u_c(t))$ à l'extrémité de tout câble intégré ou connecteur de sortie d'un **hydrophone** et de la transformée de Fourier $F(p(t))$ de la **forme d'onde des impulsions acoustiques** dans le **champ libre** non perturbé d'une onde plane à la position du **centre de référence** de l'**hydrophone** si l'**hydrophone** a été retiré

$$\underline{M}_c(f) = \frac{F(u_c(t))}{F(p(t))} \quad (4)$$

Note 1 à l'article: La **sensibilité en circuit ouvert en bout de câble** est un paramètre à valeurs complexes. Son module est exprimé en unités de volts par pascal (V/Pa). Son angle de phase est exprimé en degrés et représente la différence de phase entre la tension électrique et la pression acoustique.

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.27]

3.17

surface du transducteur externe ouverture du transducteur externe

partie de la surface d'un **transducteur ultrasonique** ou d'un **groupe d'éléments transducteurs ultrasoniques** émettant un rayonnement ultrasonore dans le milieu de propagation

Note 1 à l'article: Cette surface est réputée accessible pour procéder aux mesurages à l'aide d'un **hydrophone** dans le milieu de propagation choisi (en général, de l'eau).

Note 2 à l'article: Cette surface est en contact direct avec le patient ou avec un chemin constitué d'eau ou de liquide menant au patient.

Note 3 à l'article: Voir l'IEC 61828:2020 [5], Figure B.5.

[SOURCE: IEC 61828:2020 [5], 3.52]

3.18

champ lointain

région du champ dans laquelle $z > z_T$ est alignée sur l'**axe de faisceau** pour des transducteurs plans sans focalisation

Note 1 à l'article: Dans le **champ lointain**, la pression acoustique apparaît comme sphériquement divergente depuis un point situé sur ou à proximité de la surface rayonnante. Ainsi, la pression produite par la source acoustique est à peu près inversement proportionnelle à la distance depuis la source.

Note 2 à l'article: Le terme "**champ lointain**" est utilisé dans le présent document uniquement dans le cas de transducteurs sans focalisation. Pour les transducteurs à focalisation, une terminologie différente s'applique aux différentes parties du champ émis (voir IEC 61828 [5]).

Note 3 à l'article: Si la forme de l'ouverture du transducteur génère plusieurs **distances de transition**, la distance la plus éloignée du transducteur est utilisée.

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.30]

3.19**champ libre**

champ acoustique se développant dans un milieu homogène et isotrope dans lequel les effets des limites sont négligeables

[SOURCE: IEC 60565:2006, 3.13]

3.20**hydrophone**

transducteur qui produit des signaux électriques en réponse aux variations de pression dans l'eau

Note 1 à l'article: Il s'agit principalement d'un dispositif passif conçu et fabriqué pour répondre à la pression acoustique.

Note 2 à l'article: Dans certaines applications, il sert de dispositif actif pour l'émission du son.

[SOURCE: IEC 60050-801:2021 [6], 801-32-26]

3.21**ensemble d'hydrophones**

combinaison d'un **hydrophone** et d'un **préamplificateur d'hydrophone**

[SOURCE: IEC 62127-3:2022, 3.13]

3.22**axe de l'hydrophone**

axe de symétrie nominal de l'élément actif de l'**hydrophone**

Note 1 à l'article: Sauf indication contraire (explicite et quantitative) du fabricant, il est admis pour les besoins du présent document qu'il est donné par l'axe de symétrie géométrique apparent de l'**hydrophone**.

[SOURCE: IEC 62127-3:2022, 3.14]

3.23**taille géométrique de l'hydrophone**

taille géométrique d'un élément actif de l'hydrophone

a_g

taille définie par les extensions latérales de l'élément actif d'un **hydrophone**

Note 1 à l'article: La **taille géométrique de l'hydrophone** est exprimée en mètres (m).

Note 2 à l'article: Pour les **hydrophones** de géométrie circulaire, la **taille géométrique de l'hydrophone** est un rayon.

Note 3 à l'article: Pour les **hydrophones** de géométrie rectangulaire, la **taille géométrique de l'hydrophone** est la moitié de la valeur la plus élevée de la longueur ou de la largeur.

Note 4 à l'article: Pour les **hydrophones** à fibre optique, la **taille géométrique de l'hydrophone** est le rayon du point lumineux à l'extrémité de la fibre.

[SOURCE: IEC 62127-3:2022, 3.11, modifié – La Note 4 à l'article a été ajoutée.]

3.24

préamplificateur d'hydrophone

dispositif électronique actif connecté ou qui doit être connecté à un **hydrophone** particulier et qui permet de réduire son impédance de sortie

Note 1 à l'article: Le **préamplificateur d'hydrophone** exige une ou plusieurs tensions d'alimentation.

Note 2 à l'article: Le **préamplificateur d'hydrophone** peut avoir un facteur de transmission de la tension directe inférieur à un. Autrement dit, il peut ne pas forcément être un amplificateur de tension stricto sensu.

[SOURCE: IEC 62127-3:2022, 3.15]

3.25

pression acoustique instantanée

$p(t)$

pression à un instant et un point donnés dans un champ acoustique, diminuée de la pression ambiante

Note 1 à l'article: La **pression acoustique instantanée** est exprimée en pascals (Pa).

[SOURCE: IEC 60050-802:2011 [7], 802-01-03, modifié – La Note 1 à l'article a été ajoutée.]

3.26

intensité instantanée

$I(t)$

énergie acoustique transmise par unité de temps dans la direction de propagation de l'onde acoustique par unité de masse perpendiculaire à cette direction à un instant et un point donnés dans un champ acoustique

Note 1 à l'article: L'**intensité instantanée** est le produit de la **pression acoustique instantanée** et de la vitesse acoustique. Il est difficile de mesurer l'intensité dans la plage de fréquences ultrasoniques. Pour les besoins des mesurages auxquels fait référence le présent document et dans des conditions de distance suffisante de la **surface du transducteur externe** (au moins un diamètre de transducteur ou une dimension de transducteur équivalente dans le cas d'un transducteur non circulaire), l'**intensité instantanée** peut être approchée par l'**intensité instantanée dérivée**.

Note 2 à l'article: L'**intensité instantanée** est exprimée en unités de watt par mètre carré (W/m^2).

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.36]

3.27

plan longitudinal

plan défini par l'**axe du faisceau** et un axe orthogonal spécifié

Note 1 à l'article: Voir l'IEC 62127-1:2022, Figure 1.

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.39]

3.28

champ proche

région du champ dans laquelle $z < z_T$ est alignée sur l'**axe de faisceau** pour des transducteurs plans sans focalisation

Note 1 à l'article: Dans le cas des transducteurs circulaires plans, il se trouve à une distance inférieure à $A_{ob}/\pi\lambda$, où A_{ob} est la **surface du faisceau de sortie** et λ est la **longueur d'onde** de l'ultrason qui correspond à la **fréquence acoustique**.

Note 2 à l'article: Si la forme de l'ouverture du transducteur génère plusieurs **distances de transition**, la distance la plus proche du transducteur est utilisée.

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.41]

3.29**centre de référence**

point situé sur un **hydrophone** ou au voisinage de celui-ci autour duquel sa sensibilité de réception acoustique est définie

Note 1 à l'article: Sauf indication contraire (explicite et quantitative) du fabricant, il est admis pour les besoins du présent document qu'il est donné par le centre géométrique de la surface frontale de l'**élément actif** de l'**hydrophone**.

[SOURCE: IEC 62127-3:2022, 3.16]

3.30**plan d'ouverture de la source**

plan de mesurage le plus proche possible du plan de la **surface du transducteur externe** et perpendiculaire à l'**axe du faisceau**

Note 1 à l'article: Si la distance de décalage est nulle, le **plan d'ouverture de la source** peut coïncider avec le plan de la **surface du transducteur externe**.

Note 2 à l'article: Voir la Figure B.5, la Figure B.7, la Figure B.9 et la Figure B.10 de l'IEC 61828:2020 [5].

[SOURCE: IEC 61828:2020 [5], 3.135]

3.31**largeur d'ouverture source**

L_{SA}

<dans un **plan longitudinal** spécifié> plus grande **largeur de faisceau** –20 dB le long de la ligne d'intersection entre le **plan longitudinal** désigné et le **plan de l'ouverture source**

Note 1 à l'article: Voir la Figure B.5 et la Figure B.6b de l'IEC 61828:2020 [5].

Note 2 à l'article: La **largeur d'ouverture source** est exprimée en mètres (m).

[SOURCE: IEC 61828:2020 [5], 3.136, modifié – Deux Notes à l'article sur les transducteurs HITU ont été supprimées.]

3.32**largeur d'ouverture du transducteur**

L_{TA}

largeur complète de l'ouverture du transducteur selon un axe spécifié orthogonal à l'**axe du faisceau** non dirigé au centre du transducteur

Note 1 à l'article: Voir la Figure 3 de l'IEC 62127-1:2022.

Note 2 à l'article: La **largeur d'ouverture du transducteur** est exprimée en mètres (m).

[SOURCE: IEC 62127-1:2022, 3.81]

3.33**distance de transition**

z_T

surface de l'ouverture divisée par π fois la **longueur d'onde effective** λ_{eff}

[SOURCE: IEC 61828:2020 [5], définition 3.153, modifiée – Dans la définition, les mots "fois la **longueur d'onde effective**" ont été ajoutés et un indice a été ajouté au symbole de la **longueur d'onde effective**.]

3.33.1

distance de transition pour la conception

z_{TD}

pour un **plan longitudinal** donné, **surface d'ouverture du transducteur**, A_{TA} , du **transducteur ultrasonique** divisée par π fois la **longueur d'onde effective** λ_{eff}

$$z_{TD} = A_{TA} / (\pi \lambda_{eff}) \quad (5)$$

Note 1 à l'article: Pour la conception, pour un transducteur ultrasonique sans apodisation à symétrie circulaire par rapport à l'**axe du faisceau**, la surface d'ouverture de la source est πa_e^2 , où a_e est le rayon effectif. La **distance de transition** est donc $z_T = a^2 / \lambda_{eff}$.

Note 2 à l'article: Pour un transducteur à focalisation sphérique, la **distance de transition** est pratiquement la même, mais plus exactement, elle est $z_T = 2D^2 \left(1 - \sqrt{1 - (a/D)^2}\right) / \lambda_{eff}$ où D est le rayon de courbure.

Note 3 à l'article: Pour la conception, pour un **transducteur ultrasonique** rectangulaire sans apodisation présentant une **largeur d'ouverture du transducteur**, L_{TA1} , dans un **plan longitudinal** spécifié, la surface effective dans le plan est $(L_{TA1})^2$. Par conséquent, pour ce plan, la **distance de transition** est $z_{T1} = (L_{TA1})^2 / (\pi \lambda_{eff})$. La **distance de transition** pour le **plan longitudinal** orthogonal incluant la deuxième **largeur d'ouverture du transducteur** est $z_{T2} = (L_{TA2})^2 / (\pi \lambda_{eff})$.

Note 4 à l'article: Pour les transducteurs à **apodisation** et à symétrie régulière ou à fonction de pondération W (normalisée pour une valeur maximale de 1 pour la distribution de vitesse de particule), les **distances de transition** sont comme suit:

Pour un transducteur à symétrie circulaire ayant un rayon actif a : $z_T = \left(\frac{2}{\lambda}\right) \int_0^a W(r) r dr$

Pour un transducteur rectangulaire ayant une ouverture physique de longueur L dans un **plan longitudinal** donné, par exemple xz :

$$z_T = \left(\frac{4}{\pi \lambda_{eff}}\right) \left[\int_0^{L/2} W(x) dx \right]^2$$

Note 5 à l'article: Pour des formes symétriques autres que les cas les plus courants de symétrie circulaire et de géométrie rectangulaire, la même définition de **distance de transition** peut être employée. Par exemple, pour des ouvertures à symétrie n ($n > 2$) telles que des hexagones ou octogones, la **distance de transition** dans un plan de symétrie perpendiculaire à un côté est égale à la surface de l'ouverture divisée par $(\pi \lambda_{eff})$. Pour des réseaux annulaires à plusieurs anneaux, la surface équivalente est la surface totale (de tous les anneaux) de l'ouverture active. Dans les cas où un phasage unique est employé, tels que pour un réseau annulaire à changements de phase alternés (0° ou 180°) et à focalisation dirigée ou dans les cas où l'ouverture est de forme et de phasage inhabituels, un calcul de diffraction tridimensionnel est employé pour déterminer la **largeur de faisceau** minimale correspondant à la **distance de transition** appropriée.

Note 6 à l'article: La **distance de transition pour la conception** est exprimée en mètres (m).

[SOURCE: IEC 61828:2020 [5], 3.153.1, modifié – Un indice a été ajouté au symbole de la **longueur d'onde effective** et la Note 6 à l'article a été supprimée.]

3.33.2**distance de transition pour les mesures** z_{TM}

pour un **plan longitudinal** donné, **surface d'ouverture de la source**, A_{SAeff} , du **transducteur ultrasonique** divisée par π fois la **longueur d'onde effective** λ_{eff}

$$z_{TM} = A_{SAeff} / (\pi \lambda_{eff}) \quad (6)$$

Note 1 à l'article: Pour les mesures dans chaque **plan longitudinal** spécifié, la **largeur d'ouverture de la source** dans ce plan est utilisée ou $z_{T1} = (L_{SA1})^2 / (\pi \lambda_{eff})$. Dans l'autre plan orthogonal, $z_{T2} = (L_{SA2})^2 / (\pi \lambda_{eff})$.

Note 2 à l'article: La **distance de transition pour les mesures** est exprimée en mètres (m).

[SOURCE: IEC 61828:2020 [5], 3.153.2, modifié – Un indice a été ajouté au symbole de la **longueur d'onde effective**.]

3.34**incertitude**

paramètre, associé au résultat d'un mesure, qui caractérise la dispersion des valeurs qui peuvent être raisonnablement attribuées au mesurande

Note 1 à l'article: Voir le Guide 98-3:2008 de l'ISO/IEC [10], 2.2.3.

3.35**longueur d'onde** λ

distance, dans la direction de la propagation d'une onde périodique, entre deux positions successives auxquelles la phase est la même

Note 1 à l'article: La **longueur d'onde** est exprimée en mètres (m).

[SOURCE: IEC 60050-845:2020 [8], 845-21-025, modifié – Les Notes 1, 2, 3, 5 et 6 à l'article ont été supprimées. La Note 4 à l'article a été renumérotée en Note 1 à l'article et "ou en sous-multiples décimaux du mètre" a été supprimé.]

4 Liste des symboles

a_g	taille géométrique de l'hydrophone
a_h	taille efficace de l'hydrophone
a_{max}	rayon efficace maximal pour une application particulière de l' hydrophone
a_p	distance latérale à partir de l' axe du faisceau (a_{PmaxE} , a_{PmaxH} : valeurs maximales qui permettent d'éviter les interférences entre l'onde de bord et l'onde réfractée, respectivement)
a_t	rayon efficace d'un transducteur ultrasonique sans focalisation
A_g	surface géométrique d'un transducteur ultrasonique
B/A	paramètre de non-linéarité de Fox-Wallace
c	vitesse du son dans un milieu (en principe de l'eau)
C_H	capacité électrique en bout de câble de l' hydrophone , y compris le câble intégré et le connecteur
d_1	distance entre le transducteur auxiliaire et le réflecteur, mesurée le long de l'axe de symétrie

d_h	distance entre le transducteur auxiliaire et l'élément actif de l' hydrophone , mesurée le long de l'axe de symétrie
d_m	distance entre le transducteur auxiliaire et la dernière valeur minimale de l'amplitude de la pression acoustique le long de l'axe de symétrie du transducteur auxiliaire
$D(\theta)$	fonction de la réponse directionnelle normalisée
e	base des logarithmes naturels
f	fréquence
f_f	fréquence de commande fondamentale d'un signal utilisée pour générer une déformation non linéaire
f_u	limite de fréquence supérieure de la bande de fréquences indiquée d'un hydrophone
F	longueur focale géométrique d'un transducteur à focalisation
G_{th}	correction qui tient compte de la diffraction dans le champ de propagation et qui est liée à la génération d'une forme d'onde par le transducteur et à la réception par l' hydrophone
G_{tt}	correction qui tient compte de la diffraction dans le champ de propagation et qui est liée à la génération et à la réception d'une forme d'onde par le transducteur
i	unité imaginaire
I_p	amplitude de l' intensité instantanée par hypothèse proportionnelle à la pression acoustique au carré
I_{sc}	courant mesuré sur une liaison en court-circuit qui remplace le transducteur
I_t	émission en courant commandée à un transducteur
$\vec{I}(x,y,z,t)$	vecteur d' intensité instantanée au point (x,y,z) à l'instant t
$I(x,y,z,t)$	composante du vecteur d' intensité instantanée dans la direction de propagation au point (x,y,z) à l'instant t
j_{max}	numéro du point de balayage le plus éloigné d'un balayage radial
J_p	coefficient de réciprocité pour les ondes planes
k	nombre d'ondes circulaires ($= 2\pi/\lambda$)
L_{SA}	largeur d'ouverture source
L_{TA}	largeur d'ouverture du transducteur
$L_{M_L}(f)$	niveau de sensibilité en bout de câble
$L_{M_C}(f)$	niveau de sensibilité en circuit ouvert en bout de câble
$\underline{M}$	symbole général de la sensibilité complexe de l' hydrophone , $M = \underline{M} $ étant son module et $\arg(\underline{M})$ étant son argument ($=$ angle de phase)
$\underline{M}_C(f)$	sensibilité en circuit ouvert en bout de câble
$\underline{M}_L(f)$	sensibilité en bout de câble
M_t^*	réponse apparente de réception en tension d'un transducteur auxiliaire
N_{av}	nombre de moyennes de forme d'onde prises pour générer une forme d'onde de la moyenne temporelle des tensions
N	nombre d'échantillons diamétraux
N_{harm}	rang harmonique

p_0	amplitude de la pression
p_1	amplitude de la pression acoustique au niveau de la face d'un transducteur
p_a	pression acoustique générée par un transducteur à sa surface
p_i	pression acoustique incidente sur la surface du transducteur
p_h	pression acoustique incidente sur la surface de l' hydrophone
$p(x,y,z,t)$	pression acoustique instantanée au point (x,y,z) à l'instant t
$P(l)$	puissance ultrasonore totale qui passe par un plan d'étendue infinie dans un champ acoustique à une distance l d'un transducteur ultrasonique
P_o	puissance ultrasonore totale émise par un transducteur
rf	signaux radioélectriques
r	distance entre le centre du faisceau ultrasonore et un point de balayage
R	$(l / \pi a_1^2)$ distance normalisée entre un transducteur et un hydrophone en distance Rayleigh $(\pi a_1^2 / \lambda)$
R_{RT}	coefficient de réflexion d'amplitude pour l'interface réflecteur/eau
R_{1i}, R_{2i}	distances entre le centre du faisceau et les extrêmes du i^e balayage diamétral de faisceau
s	distance entre le centre du faisceau ultrasonore et le point de balayage le plus proche
S_t^*	réponse apparente de transmission au courant d'un transducteur auxiliaire
t_H	instant d'arrivée de l'onde réfractée la plus proche
t_{TDS}	instant disponible d'un mesurage en champ libre en spectrométrie de temporisation
T	facteur de transmission acoustique
$\underline{T}(f)$	facteur de transmission acoustique à valeurs complexes dans le domaine fréquentiel
U_{load}	tension mesurée en couplant le transducteur au système
$U_L(x,y,z,t)$	tension en bout de câble d'un hydrophone , avec l' hydrophone placé au point de référence (x,y,z) à l'instant t
$U_L'(x,y,z,t)$	tension en bout de câble d'un hydrophone , y compris le bruit, avec l' hydrophone placé au point de référence (x,y,z) à l'instant t
$U_n(x,y,z)$	niveau de bruit efficace mesuré avec un hydrophone au point de référence (x,y,z)
U_t	tension générée par un transducteur en mode réception
U_T	tension au niveau des bornes d'un transducteur ultrasonique
$\vec{v}(x,y,z,t)$	vecteur de vitesse acoustique instantanée au point (x,y,z) à l'instant t
v_t	vitesse d'une onde radiale dans une plaque du transducteur
w_f	largeur de faisceau de la composante du champ de fréquence fondamentale
z	distance axiale entre un hydrophone et la surface d'un transducteur ultrasonique. (z_1, z_2, z_3 et z_4 sont des valeurs de distance particulières qui reposent sur certains critères qui impliquent des ondes de bord et des ondes réfractées)

$z_{\min}$	distance minimale entre un hydrophone de taille finie et un transducteur
z_{pf}	distance entre le foyer de pression et un transducteur à focalisation
Z_{RT}	impédance acoustique caractéristique du réflecteur
z_{T}	distance de transition
z_{TD}	distance de transition pour la conception
z_{TM}	distance de transition pour les mesurages
Δz	différence de distance
Z_{h}	impédance de sortie électrique complexe d'un hydrophone
Z_{L}	impédance de charge électrique complexe
α	coefficient d'atténuation de l'amplitude des ondes planes dans un milieu (habituellement de l'eau)
β	paramètre de non-linéarité dans le sens de l'équation $\beta = 1 + B/(2A)$
δ	amplitude de la seconde harmonique exprimée sous la forme d'un pourcentage de la pression acoustique à la fréquence fondamentale
δ_{av}	correction de l'amplitude de la pression pour une dimension finie de l' hydrophone
θ	angle entre la direction de propagation des ultrasons et l'axe z , équivalent à l'angle entre la droite qui relie le centre du transducteur ultrasonique au centre de l' hydrophone et la direction de propagation
θ_1	angle entre la droite qui relie le centre du transducteur ultrasonique au centre de l' hydrophone et la direction de la sensibilité maximale de l' hydrophone
γ	quotient du rayon du faisceau sur le rayon efficace de l' hydrophone
ζ	déplacement acoustique mesuré par un interféromètre optique
θ	angle d'incidence d'une onde ultrasonique par rapport à l'axe de l' hydrophone
λ	longueur d'onde
λ_{eff}	longueur d'onde effective
λ_l	longueur d'onde optique; longueur d'onde de la lumière dans le vide
ξ	$\pi/2$ fois la longueur de Rayleigh (a_t^2/λ , voir l'IEC 61828 [5]) d'un transducteur à focalisation
ρ	(masse) densité du liquide de mesure (eau)
ρc	impédance acoustique caractéristique du liquide de mesure (eau)
σ	paramètre de déformation non linéaire
σ_q	paramètre de déformation locale
τ	durée d'impulsion ou de salve (τ_{maxE} , τ_{maxH} : valeurs maximales qui permettent d'éviter les interférences entre l'onde de bord et l'onde réfractée, respectivement)
ω	fréquence circulaire

5 Vue d'ensemble des procédures d'étalonnage

5.1 Principes

Les **hydrophones** sont exigés pour les mesurages absolus des propriétés d'un champ acoustique. La tension de sortie en fonction du temps d'un **hydrophone**, $u(t)$, peut être représentée par:

$$u(t) = p(t) * m(t) \quad (7)$$

où

$p(t)$ est la forme d'onde de pression;

$*$ est une convolution;

$m(t)$ est la réponse impulsionnelle de l'**hydrophone**.

Utilisé dans le domaine de Fourier, si $\underline{U}(f)$, $\underline{P}(f)$ et $\underline{M}(f)$ sont les transformées de Fourier respectives, alors le spectre de tension qui en résulte, $\underline{U}(f)$, est égal à $\underline{P}(f) \times \underline{M}(f)$. La grandeur $\underline{M}(f)$ est la fonction de transfert de l'**hydrophone** (sensibilité) et sa valeur complexe est composée d'éléments réels et imaginaires.

Dans le passé, les **hydrophones** à ultrasons étaient utilisés presque exclusivement comme détecteurs d'amplitude. Cette situation a évolué au cours des dernières années, et il est de plus en plus souvent considéré comme utile de disposer d'informations de phase supplémentaires. Certaines procédures d'étalonnage des **hydrophones** ont été étendues à la détermination des caractéristiques de phase. L'IEC 62127-1:2022 s'appuie en partie sur les informations de phase des **hydrophones** dans les applications de déconvolution des formes d'onde. Cependant, la norme de mesure des **hydrophones** fournit également une méthode d'extraction de la réponse en phase à partir des données du module de sensibilité comme variante à l'étalonnage de la réponse en phase. L'Annexe J récapitule les capacités actuelles en matière de mesurage de phase (relatif) et le F.2.3.2 donne une méthode d'étalonnage à valeurs complexes complète.

Les procédures d'étalonnage des **hydrophones** sont spécifiées selon les principes suivants:

a) étalonnage à l'aide d'un transducteur normalisé.

Un **hydrophone** peut être étalonné par comparaison à un transducteur normalisé utilisé comme source de puissance ultrasonore. La puissance de sortie du transducteur doit être déterminée à l'aide des techniques de balance de forces de rayonnement selon l'IEC 61161;

b) étalonnage sans l'aide d'un transducteur normalisé.

Ce type d'étalonnage couvre:

1) l'étalonnage par réciprocité

Étalonnage reposant sur le principe de réciprocité, dans lequel au moins un transducteur est un transducteur réciproque;

2) l'étalonnage physique

Étalonnage dans lequel la pression acoustique au niveau de l'**hydrophone** est calculée à partir du mesurage d'un paramètre physique lié au champ acoustique, comme le déplacement acoustique (par exemple interférométrie optique).

NOTE L'étalonnage "absolu" de l'**hydrophone** s'entend ici dans le sens de "sans référence à un autre **hydrophone**". Il est parfois également appelé étalonnage "principal". D'autre part, dans la pratique, les **hydrophones** sont souvent étalonnés suivant une procédure "secondaire" ou "de substitution", ce qui implique une comparaison de sensibilité avec un **hydrophone** de référence étalonné. L'**hydrophone** de référence lui-même peut avoir été étalonné en termes "absolus" ou par rapport à un autre **hydrophone** de référence, et ainsi de suite. De toute évidence, il existe deux procédures fondamentales différentes: l'une réalise un étalonnage absolu de l'**hydrophone**, et l'autre compare la sensibilité de deux **hydrophones**. L'Article 9, l'Article 10, l'Article 11, l'Annexe D, l'Annexe F et l'Annexe H traitent de la première procédure. La seconde procédure est traitée en détail à l'Article 12. Noter qu'un étalonnage de substitution implique en général les deux étapes, et qu'il est prévu que l'utilisateur se reporte à l'Article 12 et aux autres articles qui couvrent l'étalonnage absolu (et que les **incertitudes** liées aux deux étapes fondamentales contribuent à l'**incertitude** de l'étalonnage final en cas d'étalonnage de substitution).

5.2 Récapitulatif des procédures d'étalonnage

Les plages de fréquences appropriées des différentes méthodes qui peuvent être utilisées pour étalonner des **hydrophones** à ultrasons sont données ci-après, avec la référence de l'article qui précise la méthode en question. Le Tableau 1 fournit une tabulation de l'**incertitude** d'étalonnage type qu'il est possible d'atteindre.

- a) Étalonage par réciprocité en **champ libre** (Article 9)
 - Étalonage sans transducteur normalisé dans un **champ libre**, entre 50 kHz et 15 MHz.
- b) Étalonage en **champ libre** par balayage planaire (Article 10)
 - Étalonage avec un transducteur normalisé dans un **champ libre**, entre 500 kHz et 15 MHz.
- c) Étalonage en **champ libre** par interférométrie optique (Article 11)
 - Étalonage physique effectué par mesurage en **champ libre** du déplacement acoustique, entre 200 kHz et 100 MHz.
- d) Étalonage par comparaison à l'aide d'un **hydrophone** normalisé (Article 12)
 - Étalonage par comparaison à un **hydrophone** normalisé étalonné, entre 50 kHz et 40 MHz.

Tableau 1 – Liste des valeurs d'incertitude types (pour une couverture à 95 %) obtenues par les méthodes d'étalonnage spécifiées dans le présent document et pour la plage de fréquences indiquée

Article	Méthode	Plage de fréquences	Incertitude
9	Étalonnage par réciprocité à deux transducteurs (9.3.4)	1 MHz à 2 MHz	6 %
		jusqu'à 10 MHz	10 %
		jusqu'à 15 MHz	16 %
	Étalonnage par réciprocité à trois transducteurs (9.3.2)	50 kHz à 100 kHz	5 %
		jusqu'à 500 kHz	6 %
		jusqu'à 1 MHz	10 %
10	Étalonnage en champ libre par balayage planaire (Annexe D)	500 kHz à 10 MHz	6 %
		jusqu'à 15 MHz	18 %
11	Étalonnage en champ libre par interférométrie optique (Annexe F)	200 kHz ^a à 1 MHz	7 %
		jusqu'à 10 MHz	7 %
		jusqu'à 20 MHz	8 %
		jusqu'à 30 MHz	10 %
		jusqu'à 40 MHz	11 %
		jusqu'à 60 MHz	11 %
		jusqu'à 80 MHz	17 %
		jusqu'à 100 MHz	36 %
12	Étalonnage par comparaison à l'aide d'un hydrophone normalisé (12.5.2) (Annexe G, Annexe H)	50 kHz à 200 kHz	9 %
		jusqu'à 1 MHz	8 %
		jusqu'à 10 MHz	7 %
		jusqu'à 20 MHz	11 %
		jusqu'à 30 MHz	12 %
		jusqu'à 40 MHz	12 %

^a Il convient de ne pas prendre la plage de fréquences inférieure de 200 kHz comme la limite inférieure à laquelle les étalonnages peuvent être effectués par interférométrie optique. Cette limite inférieure est en général contrôlée par les réflexions en provenance des parois des réservoirs d'eau, du dispositif en cours d'étalonnage ou d'autres restrictions techniques.

5.3 Consignation des résultats

Le module de la sensibilité en bout de câble de l'**ensemble d'hydrophones** doit être indiqué en V/Pa ou en sous-multiples décimaux ou sous la forme d'un niveau logarithmique en dB en référence à la valeur de sensibilité indiquée. Il doit être précisé si la valeur de sensibilité indiquée est la **sensibilité en circuit ouvert en bout de câble** ou la **sensibilité en bout de câble**. Dans ce dernier cas, les conditions de charge électrique correspondantes, c'est-à-dire l'**impédance de charge électrique**, doivent être indiquées afin d'obtenir la sensibilité indiquée.

La phase de la sensibilité en bout de câble peut être indiquée en fonction de la fréquence sous forme de liste de valeurs et, par ailleurs, sous forme graphique.

NOTE 1 L'expression "en bout de câble" fait référence à l'extrémité du câble de sortie de l'**ensemble d'hydrophones**, avec ou sans **préamplificateur de l'hydrophone**.

L'**incertitude** de la sensibilité indiquée doit être donnée. Si la sensibilité est donnée pour un intervalle de fréquence, alors l'**incertitude** doit l'être pour exactement le même intervalle. Si la sensibilité est donnée pour un certain nombre de points de fréquence, alors il convient de donner l'**incertitude** pour des intervalles de fréquences susceptibles d'aider l'utilisateur.

NOTE 2 Des recommandations relatives à l'évaluation de l'**incertitude** peuvent être obtenues à l'Annexe A.

L'intervalle de fréquence sur lequel est donnée la sensibilité et sur lequel s'applique l'**incertitude** doit être indiqué. Pour les besoins du présent document, les valeurs de sensibilité et d'**incertitude** peuvent être données séparément pour plusieurs intervalles de fréquence. La réponse en fréquence peut être donnée en valeurs de sensibilité absolue ou dans une représentation en valeur relative, en fonction de la référence à la sensibilité absolue de l'**hydrophone** à une certaine fréquence. Dans le cas d'une représentation en valeur relative, la sensibilité de référence et la fréquence à laquelle elle s'applique doivent être indiquées.

Les méthodes qui permettent de déterminer la sensibilité et son **incertitude** doivent être décrites.

Un étalonnage est uniquement valide pour les conditions d'environnement existantes lors de l'étalonnage. Les conditions d'environnement liées à cet étalonnage doivent donc être indiquées. Il doit s'agir de toutes les conditions qui peuvent avoir une influence sur la sensibilité du dispositif d'essai. Les conditions à consigner dans un rapport doivent inclure:

- la date de l'étalonnage;
- la température de l'eau et son **incertitude**;
- si l'**ensemble d'hydrophones** contient ou non un **préamplificateur d'hydrophone**, y compris les informations d'identification unique;
- les propriétés de l'eau, la durée de trempage et la procédure de mouillage adoptée (ajout d'un produit mouillant, par exemple);

NOTE 3 La sensibilité d'une seule couche (les **hydrophones** à membrane sans blindage électrique, par exemple), est altérée par la conductivité électrique de l'eau utilisée.

NOTE 4 La réponse de certains **hydrophones** peut varier lors de l'immersion dans l'eau. Il est donc important de procéder aux étalonnages uniquement après un trempage suffisant, de manière à stabiliser la réponse.

- l'orientation de l'**hydrophone** par rapport à l'axe ou à la marque d'alignement placée sur son corps ou son enveloppe;
- si la disposition du montage influe sur la sensibilité d'un **hydrophone**, ses caractéristiques détaillées doivent être spécifiées;

NOTE 5 Il est important d'apporter une attention particulière à la conception du montage de l'**hydrophone** aux basses fréquences (inférieures à 200 kHz) auxquelles les **longueurs d'ondes** acoustiques sont suffisamment grandes pour que l'utilisation de longues salves de tonalité puisse entraîner la pollution du signal acoustique direct du fait des réflexions en provenance du montage. L'importance de l'effet peut être étudiée par une variation de la longueur de la salve et l'observation de l'influence des réflexions sur le signal de l'**hydrophone**. Il peut être utile d'utiliser des absorbeurs acoustiques pour supprimer ces réflexions. La sensibilité de l'**hydrophone** peut également être altérée par les moyens de fixation de l'**hydrophone**, et ce phénomène peut également être évalué par un examen systématique des différentes configurations. En outre, pour certains **hydrophones** à sonde et à aiguille, en fonction de la géométrie de construction, des réverbérations internes peuvent être présentes, mais ne survenir qu'après un délai important. Il est donc important de s'assurer que les conditions d'insonation relatives à l'étalonnage de l'**hydrophone** sont appropriées pour son application ultérieure [11].

- une spécification des caractéristiques des câbles supplémentaires connectés à l'**hydrophone**, lors de l'étalonnage;
- la direction nominale de l'incidence ultrasonique par rapport à l'**hydrophone**;

NOTE 6 Cela est important, car l'ouvrage [12] a démontré que même pour les **hydrophones** à membrane, la réponse peut varier en cas d'inversion de la direction de propagation ultrasonique par rapport à l'**hydrophone**.

- la pression acoustique maximale relevée par l'**hydrophone** lors de l'étalonnage;

NOTE 7 L'Annexe B décrit la linéarité des **hydrophones** en polyfluorure de vinylidène (PVDF, *PolyVinylideneFluoride*) utilisée pour caractériser les champs acoustiques à haute amplitude.

- toutes les hypothèses concernant le dispositif soumis à l'essai (la position du **centre de référence de l'hydrophone**, par exemple).

Si un **hydrophone** étalonné est utilisé dans un environnement sensiblement différent de celui qui existait lors de l'étalonnage, l'utilisateur peut être obligé de renforcer son évaluation des incertitudes de mesure pour tenir compte de la modification de l'environnement.

5.4 Périodes d'étalonnage recommandées

La période d'étalonnage recommandée de l'**hydrophone** dépend de ses caractéristiques. Cet intervalle doit être spécifié par le fabricant.

NOTE 1 Une période d'étalonnage d'une année est appropriée dans la plupart des cas (voir l'IEC 62127-3).

Il est recommandé de soumettre à un étalonnage annuel les **hydrophones** de référence qui sont uniquement utilisés à des fins d'étalonnage. Si les **hydrophones** sont utilisés sur le terrain, des étalonnages peuvent être exigés à des intervalles plus courts.

NOTE 2 Il peut être utile de vérifier l'étalonnage d'un **hydrophone** en fonctionnement (ou de terrain) en le comparant par "contrôle ponctuel" à un second **hydrophone** (de référence) étalonné ou à une source de contrôle, en s'appuyant sur l'un des concepts de forme d'onde décrits à l'Annexe G. Dans les cas extrêmes, lorsque la stabilité d'un **hydrophone** en fonctionnement est source de préoccupation, cette vérification peut être réalisée avant et après les mesurages (voir l'utilisation de l'**hydrophone** dans l'IEC 62127-1).

6 Exigences génériques d'un système d'étalonnage d'hydrophone

6.1 Positionnement mécanique

6.1.1 Généralités

Il est nécessaire de placer et d'orienter avec précision le transducteur, l'**hydrophone** et le réflecteur (pour la méthode par réciprocité spécifiée à l'Article 9). Par ailleurs, il convient de monter ces composants sur des supports stables et rigides qui permettent les réglages appropriés. Il est recommandé d'équiper l'**hydrophone** et le transducteur d'un dispositif de réglage de leurs positions latérales et de leur orientation, de sorte que la modification du signal de sortie de l'**hydrophone** soit inférieure à 0,1 dB lorsque les montages qui contrôlent la position spatiale ou l'orientation relative de l'**hydrophone** sont déplacés par incrément de un.

6.1.2 Exactitude de la position axiale de l'hydrophone

La distance axiale du **centre de référence de l'hydrophone** à partir du transducteur doit être connue et reproductible à 0,2 mm près.

NOTE 1 Pour déduire l'**incertitude** d'étalonnage, les mesurages peuvent être répétés, ce qui peut impliquer la dépose et le remplacement de l'**hydrophone**. Le nouvel **hydrophone** est alors placé au même endroit dans le champ du transducteur.

NOTE 2 La distance entre l'**hydrophone** et le transducteur peut être évaluée à partir de la connaissance du temps qui s'écoule entre le moment auquel l'excitation électrique est appliquée au transducteur et le moment auquel l'onde acoustique arrive au niveau de l'**hydrophone**, et de la connaissance de la vitesse du son dans l'eau à la température particulière concernée.

Il est possible que cette exigence nécessite une modification dans le cas de transducteurs sources à focalisation, selon la distribution réelle du champ axial.

NOTE 3 Pour les transducteurs sources à focalisation qui fonctionnent dans la plage de fréquences du présent document, le positionnement est essentiel. Les éléments suivants sont une évaluation de la modification de la distance axiale par rapport à la longueur focale, c'est-à-dire $\Delta z = F - z$, ce qui entraîne une réduction de pression de 1 dB. À partir de la formule théorique $\sin[\zeta(1/z - 1/F)] / [\zeta(1/z - 1/F)] = 0,89$, où $\zeta = \pi a_t^2 f / (2c)$, un développement sinusoïdal à deux termes donne $\Delta z = 0,808 F^2 / \zeta$.

NOTE 4 Dans l'exemple suivant, si une onde ultrasonore plane dans la plage d'amplitudes linéaires se propage dans une eau à 22 °C, les amplitudes ultrasonores à deux positions axiales placées à 2 mm d'intervalle diffèrent de 0,09 dB ou de 0,7 dB pour une fréquence de 15 MHz ou de 40 MHz, respectivement, du fait de l'atténuation dépendant de la fréquence (voir l'Annexe E).

6.1.3 Exactitude de la position latérale de l'hydrophone

Il convient de vérifier la variation de la tension de sortie de l'**hydrophone** lorsque la position latérale de l'**hydrophone** a varié afin d'assurer l'optimisation du signal. Concernant la position latérale de l'**hydrophone**, le signal de sortie ne doit pas être diminué de plus de 0,5 dB par rapport à la valeur maximale.

NOTE Dans le **champ lointain** d'une source circulaire théorique à piston plan et dans le plan focal d'un transducteur à focalisation théorique dans des conditions de propagation linéaire, la distance latérale depuis l'axe du champ est $r = 0,107 \cdot c \cdot z / (f \cdot a_t)$ pour une réduction d'amplitude de 0,5 dB et $r = 0,151 \cdot c \cdot z / (f \cdot a_t)$ pour une réduction d'amplitude de 1 dB.

6.2 Mesurages et stabilité de la température

Les propriétés électroacoustiques des **hydrophones** varient en fonction de la température ambiante. Il est de ce fait recommandé, dans la mesure du possible, d'étalonner l'**hydrophone** dans les mêmes conditions de température que celles dans lesquelles il sera utilisé. Si cet étalonnage n'est pas possible, alors les valeurs de sensibilité et de réponse en fréquence de l'**hydrophone** peuvent être corrigées en fonction des étalonnages précédents ou de modèles d'analyse validés. Il convient que l'**incertitude** des valeurs corrigées de la sensibilité et de la réponse de l'**hydrophone** soit inférieure aux valeurs non corrigées.

Les dérives en température doivent être évitées pour deux raisons:

- a) l'amplitude de l'onde ultrasonore qui arrive à l'**hydrophone** dépend de la température, en raison de l'atténuation des ultrasons dans l'eau en fonction de la température (voir l'Annexe E);
- b) le temps de vol du signal ultrasonore dépend de la température, en raison de la vitesse du son dans l'eau en fonction de la température (voir l'Annexe E, Tableau E.1). Ces phénomènes sont liés au réglage du portillonnage temporel pour les salves ou les impulsions et à la spectrométrie de temporisation.

Compte tenu de a), l'exemple suivant peut être donné. Si une onde ultrasonore dans la plage d'amplitudes linéaires se propage sur 15 cm à une température d'environ 22 °C, l'amplitude ultrasonore obtenue diffère, pour un écart de 1 °C entre deux températures, de 0,2 dB à une fréquence de 15 MHz et de 1,5 dB à une fréquence de 40 MHz. (Le coefficient d'atténuation dans l'eau est proportionnel au carré de la fréquence. Les valeurs en fonction de la température sont données à l'Annexe E).

Compte tenu de b), la recommandation suivante peut être formulée: dans un mesurage de Type II spécifié à l'Article 12 (comparaison de la sensibilité de deux **hydrophones** ou plus), il convient d'ajuster la distance axiale de l'**hydrophone** à une durée de propagation constante.

6.3 Taille de l'hydrophone

L'élément actif d'un **hydrophone** génère une tension dans ses électrodes proportionnelle à la pression acoustique moyenne sur sa surface. Si une résolution spatiale totale doit être obtenue, la **taille efficace de l'hydrophone** doit être faible en comparaison à la **longueur d'onde** de la composante à la fréquence la plus élevée dans le champ acoustique utilisé pour l'étalonnage. De plus, la pression acoustique réelle sur la surface sensible de l'**hydrophone** est influencée par la diffraction de l'**hydrophone** lui-même [9],[13],[14].

NOTE 1 Si l'**hydrophone** est soigneusement conçu pour avoir une surface active connue ou bien définie, il est possible d'éliminer les effets de la moyenne spatiale et de la diffraction des données, à une fréquence spécifiée, par déconvolution, à partir des dimensions connues de l'élément actif.

NOTE 2 Des recommandations relatives à l'évaluation de l'influence de la moyenne spatiale sur les étalonnages peuvent être obtenues dans l'IEC 62127-1 et à l'Annexe J.

6.4 Récipient de mesure et propriétés de l'eau

Le réservoir d'essai doit être suffisamment grand pour établir des conditions en **champ libre** à la fréquence étudiée la plus basse. Il convient qu'il soit également suffisamment grand pour faire varier la séparation entre transducteur et **hydrophone** dans une mesure qui soit cohérente avec les exigences de la technique d'étalonnage appliquée.

Il convient que les parois du réservoir et la surface de l'eau se situent à une distance suffisante du transducteur et de l'**hydrophone** pour s'assurer que tout signal issu des réflexions au niveau de ces surfaces ne gêne pas l'arrivée du premier signal généré par le transducteur. De plus, dans la mesure du possible, il convient que ces surfaces soient revêtues de matériaux neutres du point de vue acoustique.

Il est important que le signal acoustique ne soit pas pollué par des réflexions. Il est recommandé d'effectuer la vérification suivante avant chaque mesurage. Dans tous les cas où des salves ou des impulsions sont appliquées, il convient d'observer le signal de sortie de l'**hydrophone** lorsque la distance entre le transducteur et l'**hydrophone** varie de plusieurs millimètres, afin d'assurer l'absence de plusieurs échos entre le transducteur et l'**hydrophone** à partir du signal reçu. Si ces échos gênent le signal reçu, une solution peut être de modifier la fréquence de répétition des impulsions.

Les propriétés de l'eau doivent correspondre à la spécification fournie par le fabricant de l'**hydrophone**.

NOTE La sensibilité de certains **hydrophones** peut dépendre de la conductivité électrique du milieu aqueux. Dans ces cas, il est important d'accorder une attention particulière aux conditions de mesure pour s'assurer qu'elles se rapprochent le plus possible de celles de l'étalonnage.

6.5 Mesurage de la tension de sortie

Le signal en provenance de l'**hydrophone** ou du **préamplificateur d'hydrophone** et de tout transducteur doit être mesuré à l'aide d'un oscilloscope, d'un analyseur de signaux numériques, d'un analyseur de spectre ou d'un autre appareil approprié avec une largeur de bande et une sensibilité suffisantes. Il est possible qu'une amplification supplémentaire du signal en provenance de l'**hydrophone** ou du **préamplificateur d'hydrophone** soit également nécessaire afin d'obtenir un rapport signal sur bruit acceptable.

L'appareil auquel est connecté l'**hydrophone** ou l'**amplificateur intégré** (un oscilloscope, un analyseur de signaux numériques, un analyseur de spectre ou un amplificateur, par exemple) doit satisfaire aux exigences suivantes:

- son impédance d'entrée complexe sur la plage de fréquences concernée appropriée doit être connue, de manière à pouvoir déterminer la **sensibilité en bout de câble** (voir l'Annexe C);
- sa linéarité avec le signal d'entrée sur une plage dynamique de 50 dB doit être supérieure à $\pm 0,3$ dB;
- dans le cas d'un analyseur de signaux numériques: pour enregistrer les formes d'onde temporelles, la fréquence d'échantillonnage doit être d'au moins $5f$ échantillons par seconde, où f est exprimée en MHz. Il convient d'envisager des mesures antirepliement le cas échéant. De même, le gain doit être ajusté pour admettre au moins sept bits significatifs dans la forme d'onde numérique.

NOTE Pour une limite de fréquence supérieure de 100 MHz par exemple, il est important que la fréquence d'échantillonnage soit d'au moins 500 millions d'échantillons par seconde.

7 Considérations électriques

7.1 Type de signal

Le signal utilisé pour l'étalonnage peut être une impulsion à large bande, un signal sinusoïdal balayé [15] ou à onde pulsée sinusoïdale (salve d'impulsions à portillonnage). Le nombre de fréquences doit être suffisant pour s'assurer que les performances de l'**hydrophone** sont bien caractérisées sur la plage de fréquences souhaitée.

NOTE Les différents concepts de forme d'onde possibles qui peuvent être utilisés pour obtenir des informations sur l'étalonnage de l'**hydrophone** sur la plage de fréquences concernée font l'objet d'une synthèse à l'Annexe G.

7.2 Mise à la terre

Pour éviter les phénomènes de boucle de masse, il convient que les bornes électriques des transducteurs n'entrent pas en contact avec l'eau. Les parties métalliques exposées d'un **hydrophone** doivent être les seuls éléments de mise à la terre pour l'écran du câble de l'**hydrophone** et l'amplificateur de l'**hydrophone**. Tous les autres contacts à la terre doivent être exclus.

NOTE Cette condition peut être assouplie lorsqu'une salve de tonalité est utilisée de sorte que le signal acoustique arrive au niveau de l'**hydrophone** après application de l'excitation électrique.

7.3 Mesurage de la tension de sortie de l'hydrophone

7.3.1 Généralités

La tension en circuit ouvert de l'**hydrophone** doit être déterminée à l'extrémité du câble de l'**hydrophone**.

Dans le cas d'un signal à ondes entretenues, le mesurage peut être réalisé à l'aide d'un voltmètre à haute impédance. Toutefois, dans le cas des signaux à salves d'impulsion, il est préférable de numériser la forme d'onde de la tension de l'**hydrophone** à l'aide, par exemple, d'un oscilloscope numérique ou d'un convertisseur analogique-numérique informatisé. Si un amplificateur, un atténuateur ou un filtre est utilisé avec le voltmètre ou le numériseur pour former un canal de mesure, ces éléments exigent généralement également un étalonnage.

NOTE Les signaux à ondes entretenues adaptés aux techniques d'étalonnage de l'**hydrophone** sont décrits à l'Annexe H. Les concepts de forme d'onde modulée en amplitude sont décrits à l'Annexe G.

7.3.2 Charge électrique par appareil de mesure

Lors des mesurages, l'**hydrophone** doit être connecté à un appareil de mesure à haute impédance d'entrée (amplificateur, voltmètre, oscilloscope ou numériseur). Si l'impédance de l'**hydrophone** est élevée (pour un petit **hydrophone** piézoélectrique de faible capacité électrique, par exemple), la charge électrique de l'**hydrophone** par l'appareil de mesure doit être prise en considération. Dans ces cas, des corrections de charge électrique doivent être appliquées à la tension mesurée afin d'obtenir la tension en circuit ouvert. Les corrections peuvent être calculées suivant la procédure indiquée à l'Annexe C. Si la même charge électrique est utilisée tout au long de l'étalonnage d'un **hydrophone** particulier, alors les corrections peuvent être appliquées à la sensibilité plutôt qu'aux différentes tensions mesurées.

NOTE 1 Si, dans une application pratique, l'**hydrophone** est utilisé avec des composants électroniques subséquents (tels qu'un amplificateur, un oscilloscope, etc.), la réponse en fréquence de l'ensemble du système est bien évidemment influencée par la réponse en fréquence de ces composants supplémentaires.

NOTE 2 Il est important d'accorder une attention particulière au caractère approprié de l'impédance de sortie de l'**hydrophone** ou de l'amplificateur par rapport à l'impédance d'entrée de l'appareil de mesure connecté.

7.3.3 Charge électrique par câbles d'extension

Si un câble d'extension est connecté à l'**hydrophone**, il charge électriquement l'**hydrophone** et des corrections doivent être appliquées afin d'obtenir la tension en circuit ouvert de l'**hydrophone** en bout de câble. Si le câble et l'**hydrophone** apparaissent purement capacitifs du point de vue électrique (ce qui est généralement le cas pour un câble et pour un **hydrophone** dans la plage de fréquences nettement inférieure à la résonance), une correction peut être déduite des capacités électriques de l'**hydrophone** et du câble. Si l'impédance de l'**hydrophone** n'est pas purement capacitive (à des fréquences proches de la résonance, par exemple), l'impédance complexe doit être utilisée pour calculer la correction de charge. Des recommandations relatives aux deux cas exposés ci-dessus sont spécifiées à l'Annexe C. Si le même câble d'extension est utilisé tout au long de l'étalonnage d'un **hydrophone** particulier, les corrections peuvent être appliquées à la sensibilité plutôt qu'aux différentes tensions mesurées.

NOTE Pour limiter l'effet de la charge électrique, certains **hydrophones** sont équipés d'un **préamplificateur d'hydrophone** généralement monté aussi près que possible de l'**hydrophone** (voir le 7.3.6). Ce facteur est particulièrement important, à des fréquences élevées, étant donné qu'il s'agit d'un moyen de limiter l'effet de résonance du câble.

7.3.4 Bruit

Le niveau de bruit électrique peut altérer l'exactitude à laquelle les mesurages électriques peuvent être réalisés. Le rapport signal sur bruit doit être suffisant pour que les mesurages puissent être réalisés sans perte significative d'exactitude. Il convient que l'amplitude du signal soit au moins 20 dB supérieure au niveau de bruit.

NOTE 1 Le niveau de bruit parasite à large bande peut être réduit à l'aide d'un filtre passe-bande dont la largeur de bande est suffisamment importante pour permettre le passage du signal sans déformation.

NOTE 2 En présence de bruit électrique, le rapport signal sur bruit peut être amélioré par le calcul de la moyenne des signaux répétés. Dans le cas du bruit aléatoire, le calcul de la moyenne des signaux N_{av} améliore le rapport signal sur bruit d'un facteur de la racine carrée de N_{av} .

7.3.5 Diaphonie (capteur de radiofréquence) et interférence acoustique

D'une manière générale, en cas d'interférence et de diaphonie, le calcul de la moyenne des signaux et le filtrage à bande étroite n'entraînent pas d'amélioration. Il convient de s'efforcer de déterminer la cause du problème et de suivre la procédure qui vise à en réduire le plus possible les effets. Le niveau d'interférence acoustique doit être au moins 30 dB inférieur au niveau du signal.

En présence de diaphonie avec les signaux à salves d'impulsion, il convient de veiller à vérifier que la longueur de la salve est supérieure au délai de propagation acoustique.

NOTE 1 Dans ces situations, la diaphonie pollue le signal acoustique direct. L'effet peut être évalué par la variation de la longueur des salves d'impulsion et par l'observation des modifications résultantes de la forme d'onde de l'**hydrophone** au moyen d'un oscilloscope.

Dans le cas d'un signal à ondes entretenues, le niveau de diaphonie doit être au moins 40 dB inférieur au niveau du signal.

NOTE 2 Le niveau du capteur de radiofréquence ou de la diaphonie peut être évalué en plaçant une couche de matériau qui assure une excellente atténuation acoustique (mais néanmoins de faible épaisseur) (du polystyrène expansé, par exemple) directement entre le transducteur et l'**hydrophone**. Cela permet d'annuler intégralement le signal acoustique, en laissant le signal dû au capteur.

7.3.6 Préamplificateurs d'hydrophone intégrés

Si un **hydrophone** est équipé d'un **préamplificateur d'hydrophone** intégré, la sensibilité peut être exprimée comme la sensibilité en bout de câble (y compris les performances du **préamplificateur d'hydrophone**). Si un **hydrophone** est équipé d'un **préamplificateur d'hydrophone** intégré, il n'est pas utile de corriger la charge électrique par câbles d'extension ou appareils de mesure.

8 Préparation des hydrophones

8.1 Généralités

Avant de procéder à l'étalonnage réel, il est nécessaire de préparer soigneusement les **hydrophones**, comme cela est indiqué du 8.2 au 8.4.

8.2 Mouillage

L'utilisateur doit vérifier que l'**hydrophone** est correctement mouillé et que toutes les bulles d'air ont disparu de l'**hydrophone** et des faces qui participent activement à l'étalonnage. Après avoir réalisé les mesurages, les faces actives doivent faire l'objet d'un nouvel examen, et les mesurages doivent être rejetés si la présence de bulles d'air est constatée.

8.3 Support de l'hydrophone

Le montage de support idéal d'un **hydrophone** doit avoir peu d'influence sur la sensibilité mesurée. Toutefois, certains **hydrophones** sont plus sensibles que d'autres à l'influence de la méthode de montage.

Si le montage exerce une quelconque influence, il convient d'étalonner l'**hydrophone** sur le même montage que celui utilisé pour les mesurages réalisés avec l'**hydrophone** sur le terrain. Si le montage a une influence sur la sensibilité mesurée, alors l'étalonnage est uniquement valide pour le type de montage utilisé. Si l'**hydrophone** est sensible au type de support ou de montage, il convient d'accompagner les résultats d'une description de la disposition du montage.

8.4 Influence du câble

Si le câble relié à l'**hydrophone** est allongé pour les besoins de l'étalonnage, l'impédance électrique du câble d'extension doit être mesurée séparément afin de calculer l'influence de la charge électrique. La manière de tenir compte de l'influence de la charge électrique est décrite à l'Annexe C.

9 Étalonnage par réciprocité en champ libre

9.1 Généralités

L'Article 9 spécifie la procédure de mesure de référence principale (voir le Guide 99:2007 de l'ISO/IEC, 2.8 [16]) d'étalonnage des **hydrophones** dans des conditions de **champ libre**, qui utilise le principe de réciprocité.

NOTE La condition de **champ libre** peut être obtenue dans une étendue d'eau confinée en suivant différentes procédures de mesure, telles que l'utilisation de salves d'impulsion (onde sinusoïdale à portillonnage temporel – voir le 10.4.4), de la spectrométrie de temporisation [17],[18], de la fluctuation de la longueur d'onde modulée en fréquence [19],[20] ou d'autres techniques [21].

9.2 Objet

L'Article 9 a pour objet de spécifier différentes méthodes d'étalonnage absolu d'**hydrophones** de laboratoire normalisés avec la plus faible **incertitude** qu'il est possible d'obtenir. Ces méthodes couvrent la plage de fréquences comprise entre 50 kHz et 15 MHz.

9.3 Principes généraux

9.3.1 Généralités

Dans le cas d'un transducteur électroacoustique linéaire, passif et réversible, il existe une relation bien définie entre la sensibilité du transducteur en **champ libre** utilisé comme détecteur et sa réponse au courant appliqué. Cette relation est exprimée pour une disposition particulière des composants à l'intérieur d'un système de transducteurs dans la définition du coefficient de réciprocité.

Tous les étalonnages fondés sur le principe de réciprocité exigent l'utilisation d'un transducteur réciproque à la fois comme émetteur et récepteur. À condition de connaître les modifications dont font l'objet l'émission et la réception dans le champ acoustique, la réponse en émission et la sensibilité à la réception du transducteur peuvent être déterminées directement en mesurant la tension du courant d'attaque et du signal reçu. Cette méthode présente l'avantage évident de déterminer les paramètres acoustiques exigés par le seul mesurage des grandeurs électriques. Dans la pratique, les étalonnages fondés sur le principe de réciprocité peuvent se présenter sous plusieurs formes, brièvement spécifiées ci-dessous.

9.3.2 Méthode d'étalonnage par réciprocité à trois transducteurs

Une procédure couramment utilisée pour les applications en acoustique marine implique l'utilisation de trois transducteurs (voir l'IEC 60565-1 [2]).

Toutefois, cette méthode peut être difficile à mettre en œuvre à des fréquences plus élevées, en raison de la nécessité de placer et d'orienter le transducteur de manière plus exacte, et de la nature complexe des caractéristiques de la **réponse directionnelle** des transducteurs utilisés aux fréquences de quelques MHz. Par conséquent, cette méthode est recommandée dans le cas d'étalonnages dans la plage de fréquences comprise entre 50 kHz et 1 MHz.

9.3.3 Méthode d'étalonnage par autorécaprocité

L'étalonnage par autorécaprocité, qui implique l'utilisation du transducteur d'essai et d'un réflecteur, exige d'effectuer un réglage géométrique minimal. Toutefois, cette technique n'est pas applicable de façon généralisée aux **hydrophones** à haute fréquence qui, en raison de leur taille, présentent une sortie acoustique insuffisante pour un rapport signal sur bruit adéquat dans le signal reçu (le diamètre minimal d'un transducteur pratique est d'environ 2 mm).

9.3.4 Méthode d'étalonnage par réciprocité à deux transducteurs

Pour la plage de fréquences comprise entre 1 MHz et 15 MHz, les **hydrophones** normalisés peuvent être étalonnés par la méthode à deux transducteurs, dans laquelle l'**hydrophone** est placé dans le champ connu généré par un transducteur auxiliaire, lequel champ a été préalablement quantifié par les procédures par autorécaprocité. La technique permet d'obtenir des données d'étalonnage d'une exactitude qui correspond aux spécifications de performances établies pour l'**hydrophone** normalisé. Cependant, elle n'implique pas les mêmes réglages essentiels de la position et de l'orientation des composants que la méthode à trois transducteurs.

9.4 Méthode d'étalonnage par réciprocité à deux transducteurs

9.4.1 Généralités

L'Annexe K du présent document fournit également, à titre informatif, des renseignements concernant cette technique d'étalonnage.

9.4.2 Transducteurs auxiliaires

Il convient d'utiliser des transducteurs auxiliaires à piston plan circulaire pour générer le champ ultrasonique dans la plage de fréquences concernée, qui est limitée à une valeur minimale de 1 MHz et à une valeur maximale de 15 MHz. La surface active d'émission (A_{ER}) doit être déterminée, conformément à l'IEC 61689, pour chaque transducteur et pour toutes les fréquences auxquelles le transducteur est destiné à être utilisé. Si une fluctuation de la longueur d'onde modulée en fréquence doit être utilisée comme signal d'excitation, la surface A_{ER} doit être déterminée au moins pour les fréquences minimale et maximale, ainsi que pour une fréquence intermédiaire de la plage concernée.

La position de la dernière amplitude de pression acoustique minimale le long de l'axe de symétrie, d_m , doit être déterminée avec une **incertitude** inférieure ou égale à 1 mm. Elle doit être déterminée selon un balayage de ligne sur un axe, conformément à l'IEC 61689, pour les mêmes fréquences que la surface A_{ER} . La distance du **champ proche** produite par le transducteur auxiliaire est définie par $N_1 = a_t^2 / \lambda$, où λ est la **longueur d'onde** ultrasonore dans l'eau à la fréquence de fonctionnement et $a_t = \sqrt{2\lambda d_m + \lambda^2}$ est le **rayon efficace du transducteur ultrasonique sans focalisation**.

La surface active d'émission (A_{ER}) est utilisée dans les formules de l'Annexe K pour évaluer correctement la correction de diffraction et le coefficient de réciprocité pour les ondes planes, tandis que la dernière amplitude de pression minimale le long de l'axe de symétrie (d_m) permet de définir indirectement la distance du **champ proche** (N_1), soit $N_1 = (2\lambda d_m + \lambda^2) / \lambda$. Bien que les deux grandeurs A_{ER} et d_m soient directement liées pour des transducteurs idéaux, elles doivent être déterminées de manière expérimentale conformément à l'IEC 61689.

Des transducteurs auxiliaires à focalisation peuvent également être utilisés, mais il est important d'envisager des corrections supplémentaires. Des précisions sur la mise en œuvre de la méthode d'étalonnage par réciprocité utilisant des transducteurs à focalisation peuvent être obtenues à l'Article K.7.

9.4.3 Réflecteur

Il convient que le réflecteur se compose d'une surface plate dont la plus petite dimension linéaire doit être au moins égale à quatre fois le **rayon efficace du transducteur ultrasonique sans focalisation** a_t . Le réflecteur doit également être plat à $\pm 10 \mu\text{m}$, avec un état de surface correct à $\pm 5 \mu\text{m}$ (rugosité de surface: $R_v < 5 \mu\text{m}$; $R_p < 5 \mu\text{m}$; $R_a < 1 \mu\text{m}$). L'épaisseur du réflecteur doit être telle que la première réflexion en provenance de la surface arrière ne gêne pas celle en provenance directe de la surface avant pour tout signal d'excitation à utiliser. Une attention particulière doit être accordée aux fluctuations de la longueur d'onde modulées en fréquence à salves longues ou à faible débit, principalement aux plus basses fréquences concernées.

Le coefficient de réflexion d'amplitude pour l'interface réflecteur/eau R_{RT} doit être déterminé de manière expérimentale, par exemple par la relation $R_{RT} = (Z_{RT} - \rho c) / (Z_{RT} + \rho c)$, où ρc est l'impédance acoustique caractéristique de l'eau et Z_{RT} est l'impédance acoustique caractéristique du réflecteur.

NOTE R_v est la profondeur maximale d'un creux, R_p est la hauteur maximale d'un pic et R_a est la moyenne arithmétique qui décrit les paramètres d'amplitude de rugosité du profil du réflecteur.

9.4.4 Champ de mesure

Étant donné que le transducteur auxiliaire et l'**hydrophone** ont tous deux des ouvertures finies, un diagramme de diffraction est présent dans le champ ultrasonique. Pour réduire le plus possible les incertitudes dues aux corrections analytiques ou numériques à appliquer aux grandeurs de mesure, le mesurage le plus proche doit être réalisé au moins à $0,9 \times N_1$, et la distance la plus lointaine ne doit pas être supérieure à $2,2 \times N_1$. La surface eau-air et les parois du réservoir doivent être suffisamment éloignées de la trajectoire ultrasonore pour qu'aucune forme d'onde réfléchie n'interfère avec la forme d'onde directe au niveau du point de mesure.

Si une structure quelconque est trop proche de la trajectoire de la forme d'onde ultrasonore directe, elle doit être recouverte d'un revêtement absorbant afin de réduire le plus possible l'interférence avec le signal de mesure, et le problème d'interférence doit être intégré dans le bilan d'**incertitude**.

9.4.5 Approche réciproque

La réciprocité peut être établie comme l'une des principales méthodes d'étalonnage d'un **hydrophone** sous réserve d'adopter certains éléments pratiques et théoriques. L'Annexe K décrit les principes fondamentaux de l'approche réciproque.

9.4.6 Procédure de mesure

Plusieurs montages distincts (voir l'Annexe K, [22], [23], [24]) peuvent être utilisés concernant le positionnement des trois éléments principaux de la méthode d'étalonnage par réciprocité à deux transducteurs: le transducteur auxiliaire, le réflecteur et l'**hydrophone**.

Quelle que soit la configuration adoptée, l'autoétalonnage du transducteur auxiliaire constitue la première étape, destinée à quantifier la pression acoustique générée par le transducteur au niveau d'un point défini du champ ultrasonique.

10 Étalonnage en champ libre par balayage planaire

10.1 Généralités

Le présent Article 10 spécifie l'étalonnage des **hydrophones** à l'aide de la méthode de balayage planaire.

10.2 Objet

Le présent Article 10 a pour objet de spécifier la méthode d'étalonnage d'un **hydrophone** par balayage planaire. Cette méthode utilise un transducteur de référence dont la puissance de sortie est connue. Ce transducteur ou cette source peut être un dispositif normalisé dont la puissance de sortie est connue et reproductible, identifiable par rapport à des étalons nationaux, ou peut être étalonné avant l'étalonnage du balayage planaire à l'aide, par exemple, d'une balance de forces de rayonnement conformément à l'IEC 61161. La méthode couvre la plage de fréquences comprise entre 500 kHz et 15 MHz, bien qu'elle puisse être appliquée à des fréquences plus élevées, avec des incertitudes dégradées.

10.3 Principe général

Si M_L est le module de la **sensibilité en bout de câble** à une fréquence unique f d'un **hydrophone** dont le **centre de référence** se situe aux coordonnées x, y, z , la **pression acoustique instantanée** $p(x, y, z, t)$ est liée à la tension en bout de câble mesurée $U_L(x, y, z, t)$ par

$$p(x, y, z, t) = U_L(x, y, z, t) / M_L \quad (8)$$

où

(x, y, z) sont les coordonnées d'un point dans le champ; et
 t est un instant donné.

Ici, $p(x, y, z, t)$ fait référence à la pression acoustique dans une onde plane avec une salve de tonalité à fréquence unique au **centre de référence de l'hydrophone** si l'**hydrophone** a été retiré.

Le vecteur d'**intensité instantanée**, $\vec{I}(x, y, z, t)$, en un point de référence d'un champ ultrasonique à partir d'un transducteur dont le centre se trouve à l'origine du système de coordonnées est donné par

$$\vec{I}(x, y, z, t) = p(x, y, z, t) \cdot \vec{v}(x, y, z, t) \quad (9)$$

où

$\vec{v}(x, y, z, t)$ est le vecteur de vitesse acoustique instantanée au point de référence.

Les composantes de $\vec{I}$ et $\vec{v}$ dans la direction de propagation sont prises en compte, ce qui les limite aux grandeurs scalaires I et v .

Dans le cas de la propagation progressive de l'onde dans certaines conditions ($a_t / l \leq 0,5$), où l est la distance axiale à partir du transducteur, l'**intensité instantanée** peut être calculée [25] par

$$I(x, y, z, t) = [p(x, y, z, t)]^2 / (\rho c) \quad (10)$$

où

ρ est la (masse) densité du liquide de mesure (eau); et
 c est la vitesse du son dans l'eau.

(Voir l'Annexe E pour connaître la dépendance à la température de ρ et c de l'eau, le milieu de transmission recommandé utilisé pour mesurer la puissance).

La puissance ultrasonore totale $P(l)$ émise à travers un plan $z = l$ perpendiculaire à l'axe z est donnée par

$$P(l) = \iint \overline{I(x, y, z, t)} \cos \theta \, dy \, dx \quad (11)$$

où

$dydx$ est une zone élémentaire du plan $z = l$;

θ est l'angle entre l'axe z et la direction de propagation, l'intégrale indiquant l'intégration sur la totalité du plan.

NOTE 1 Aux distances l prises en considération dans le présent document (supérieures à $a_t^{2/\lambda}$, où a_t est le **rayon efficace du transducteur ultrasonique sans focalisation**), θ peut être considéré comme l'angle entre l'axe z et la droite qui relie le centre du transducteur et celui de l'**hydrophone**.

La barre de la Formule (11) indique la valeur moyenne temporelle définie pour toute grandeur g par:

$$\bar{g} = \lim(T \rightarrow \infty) \left[\left(\frac{1}{2T} \right) \int_{-T}^T g(t) dt \right] \quad (12)$$

En prenant la moyenne temporelle de la Formule (10)

$$\overline{I(x, y, z, t)} = \overline{p(x, y, z, t)^2 / (\rho c)} \quad (13)$$

et de la Formule (8)

$$\overline{I(x, y, z, t)} = \overline{U_L(x, y, z, t)^2} / (M_L^2 \rho c) \quad (14)$$

où

$U_L(x, y, z, t)$ est la tension en bout de câble d'un **hydrophone**, avec l'**hydrophone** placé au point de référence (x, y, z) et à l'instant t .

Ici, il est admis par hypothèse que la valeur moyenne temporelle du carré de la tension en bout de câble est déduite. Dans la Formule (10), sur le plan $z = l$ et en ignorant le terme $\cos(\theta)$ (voir D.3.9), le module de la **sensibilité en bout de câble**, M_L , est donné par:

$$M_L = \left\{ \frac{1}{P(l) \rho c} \iint [U_L(x, y, z, t)^2] dydx \right\}^{1/2} \quad (15)$$

Par conséquent, le **module de la sensibilité en bout de câble** d'un **hydrophone** peut être déterminé par balayage de l'**hydrophone** sur un plan du faisceau ultrasonore et par division de l'intégrale de la valeur moyenne du carré du signal de l'**hydrophone** par la puissance totale du faisceau.

NOTE 2 Le module de la **sensibilité en circuit ouvert en bout de câble**, M_c , peut être déterminé en connaissant les impédances électriques de l'**hydrophone** et de l'amplificateur déterminées de la manière décrite à l'Annexe C.

10.4 Exigences de procédure

10.4.1 Balayage de l'hydrophone

Il existe plusieurs méthodes de balayage de l'**hydrophone** sur le plan $z = l$ dans le faisceau ultrasonore. La méthode la plus complète consiste à obtenir une matrice rectangulaire des points d'échantillonnage par déplacement de l'**hydrophone** dans un balayage de trame à deux dimensions. Une autre procédure de balayage est possible si le profil du faisceau en provenance du transducteur peut être considéré comme à peu près symétrique du point de vue cylindrique. Dans ce cas, un certain nombre de **balayages diamétraux de faisceau** peut être effectué. Il convient que ces balayages passent par le **centre du faisceau** ultrasonore et qu'ils soient espacés par incréments angulaires égaux. Par exemple, si deux balayages sont réalisés, il convient qu'ils soient espacés de 90° . Des recommandations relatives au choix des types de balayage peuvent être obtenues à l'Annexe D.

10.4.2 Mesurage de la puissance

Utiliser un transducteur avec un élément actif à disque plat dont la puissance de sortie totale est connue à une fréquence particulière f . Il peut s'agir d'un transducteur normalisé [26], auquel cas la puissance de sortie doit être connue en ce qui concerne la tension d'attaque particulière.

En variante, déterminer la puissance de sortie à l'aide de la méthode de force de rayonnement [27] spécifiée dans l'IEC 61161.

Quelle que soit la méthode utilisée, déterminer la puissance ultrasonore totale émise par un transducteur, P_0 , à la fréquence f dans des conditions d'excitation électrique sinusoïdale entretenue à une tension d'attaque particulière U_T ou sur une plage de différentes tensions appliquées. Ces mesurages fournissent la valeur de la puissance de sortie divisée par le carré de la tension (voir l'IEC 61161).

10.4.3 Montage du transducteur

Monter le transducteur dans un réservoir de balayage par faisceau et l'aligner de sorte que l'**axe du faisceau** du transducteur soit parallèle à l'axe z du système de balayage. Monter l'**hydrophone** à étalonner dans le réservoir de balayage et l'aligner suivant la procédure spécifiée dans l'IEC 62127-1. À l'issue de cet alignement, l'axe z du système de balayage doit être parallèle à l'**axe du faisceau** du transducteur et à la direction de la sensibilité maximale de l'**hydrophone**.

NOTE Les dispositions de montage types utilisent couramment le transducteur et l'**hydrophone** montés à l'horizontale ou à la verticale. Quelle que soit la disposition utilisée, l'alignement relatif du transducteur et de l'**hydrophone** sur l'un des axes du système de balayage (appelé ci-dessus axe z) est maintenu.

10.4.4 Conditions de mesure

Appliquer une excitation sinusoïdale à portillonnage (salve d'impulsion) au transducteur, contenant un nombre suffisant d'oscillations pour assurer des conditions permanentes de fréquence f à la tension d'attaque particulière U_T ou à une tension dans la plage utilisée dans la technique de force de rayonnement. Placer l'**hydrophone** à $z = l$ dans le **champ lointain** du transducteur et rechercher le point de pression acoustique de crête. Choisir la distance l avec soin, compte tenu des corrections de la moyenne spatiale, de la directivité et de l'atténuation (voir l'Annexe D), ainsi que de la nécessité d'obtenir un rapport signal sur bruit maximal.

Une valeur de l dans la plage comprise entre a_t^2/λ et $3a_t^2/\lambda$ est généralement satisfaisante, où a_t est le **rayon efficace d'un transducteur ultrasonique sans focalisation** et λ est la **longueur d'onde** ultrasonore. Le rayon géométrique du transducteur peut être utilisé en lieu et place si le **rayon efficace d'un transducteur ultrasonique sans focalisation** (a_t) n'est pas connu.

Utiliser l'excitation à ondes entretenues du transducteur ultrasonique si le portillonnage de l'excitation n'est pas réalisable. Dans ce cas, veiller absolument à éviter les réflexions en provenance des parois du réservoir, de l'**hydrophone** et de son support, ainsi que la formation d'ondes stationnaires.

10.4.5 Mesurages

Mesurer l'amplitude de la tension de sortie de l'**hydrophone** au fur et à mesure du balayage de l'**hydrophone** sur le plan $z = l$ perpendiculaire à l'axe z , dans le cadre d'un balayage de trame ou d'un certain nombre de **balayages diamétraux de faisceau**. Mesurer la tension en bout de câble $U_L(x, y, z, t)$ au niveau de l'**hydrophone** en fonction de la position de l'**hydrophone** dans le faisceau ultrasonore. Déterminer l'étendue de la zone balayée à partir du niveau de bruit. Cumuler le carré de la tension sur la surface du faisceau ultrasonore, puis en déduire la valeur du module de la **sensibilité en bout de câble** de l'**hydrophone** à la fréquence f (voir l'Annexe D).

10.5 Corrections et sources d'incertitude

Faire une déclaration finale de l'**incertitude** totale dans la détermination de la **sensibilité en bout de câble** de l'**hydrophone**. Des recommandations détaillées relatives à l'évaluation de ces sources d'**incertitude** peuvent être obtenues à l'Annexe D.

11 Étalonnage en champ libre par interférométrie optique

11.1 Généralités

Actuellement, l'étalonnage en **champ libre** des **hydrophones** à l'aide de techniques optiques est limité aux laboratoires spécialisés. L'Annexe F du présent document fournit, à titre informatif, des renseignements concernant cette technique d'étalonnage.

11.2 Principe

En règle générale, ces techniques impliquent l'utilisation d'éléments optiques pour déterminer le déplacement acoustique produit par un transducteur en un point du champ acoustique. Ces techniques sont réalisées à l'aide d'une fine membrane ou feuille placée à l'intérieur du champ, qui se déplace en fonction du déplacement acoustique. Une surface de la feuille, généralement épaisse de quelques microns, est métallisée de manière à acquérir des propriétés de réflexion optique. Le déplacement peut être déterminé par l'utilisation de techniques d'interférométrie optique. Dans le **champ lointain** du transducteur, le déplacement est simplement lié à la pression acoustique, ce qui permet de déterminer cette dernière en un point du champ. Un **hydrophone** est étalonné en le positionnant au même emplacement et en déterminant la tension de sortie. Trois réalisations de la technique mise en œuvre par les laboratoires nationaux normalisés peuvent être consultées à l'Annexe F.

12 Étalonnage par comparaison à l'aide d'un hydrophone normalisé

12.1 Généralités

L'Article 12 spécifie deux types de mesurages:

- Type I détermination de la **réponse directionnelle**;
- Type II comparaison de la sensibilité de deux **hydrophones** ou plus.

12.2 Objet

Les mesurages de Type I et de Type II sont dits "relatifs", ce qui signifie que deux mesurages ou plus de la tension de sortie de l'**hydrophone** dans des conditions pratiquement identiques sont réalisés, avec variation d'un seul paramètre pertinent, et que les rapports de résultats (ou logarithmes des rapports de résultats) sont pris en considération.

NOTE Concernant le Type II, les paragraphes suivants prennent pour hypothèse que les sensibilités de deux **hydrophones** sont comparées. Cette disposition peut aisément être étendue à trois **hydrophones** ou plus.

12.3 Principe

Dans le Type I, le paramètre modifié est l'angle d'orientation de l'**hydrophone**. Il est considéré que la tension de sortie de l'**hydrophone** à un certain angle dépend de cette même tension dans une orientation de référence. Bien entendu, dans la pratique, c'est le cas pour un ensemble d'angles de rotation. Ce type de mesurage a pour objet d'obtenir la **réponse directionnelle** et la **taille efficace** conformément à l'IEC 62127-3.

Dans le Type II, l'**hydrophone** lui-même est remplacé par un autre. Il est entendu ici qu'un **hydrophone** est un **hydrophone** de référence, et que l'autre est l'**hydrophone** soumis à l'essai. Ce type de mesurage a pour objet d'obtenir la sensibilité de l'**hydrophone** soumis à l'essai, si la sensibilité de l'**hydrophone** de référence est connue (à partir de tout étalonnage), et la réponse en fréquence de l'**hydrophone** soumis à l'essai, si la réponse en fréquence de l'**hydrophone** de référence est connue (à partir de tout étalonnage).

Ces mesurages relatifs ont en commun les fonctions suivantes: ils sont réalisés dans un réservoir d'eau et dans le champ ultrasonique émis par un transducteur à caractériser ci-dessous. Dans la mesure du possible, il est essentiel que les mesurages effectués en relation les uns avec les autres le soient dans des conditions identiques, c'est-à-dire dans la même position dans le champ, dans les mêmes conditions d'excitation (forme d'onde et amplitude) et dans les mêmes conditions d'environnement (température, par exemple), etc. L'objectif global est de travailler dans des conditions d'onde plane.

Pour les mesurages de Type II, l'**incertitude** de l'étalonnage est influencée par la moyenne spatiale. Les méthodes d'évaluation de ces différentes configurations de comparaison sont spécifiées au 12.6.

12.4 Exigences de procédure

12.4.1 Transducteur source

Le transducteur à source ultrasonique destiné aux mesurages spécifiés ici doit être un transducteur ultrasonique à symétrie circulaire destiné à être utilisé dans l'eau. L'excitation électrique appliquée au transducteur, le type de transducteur et la nature de la forme d'onde acoustique à la position de l'**hydrophone** (linéaire, déformée de manière non linéaire) font l'objet de différents concepts. Chacun d'eux est décrit à l'Annexe G. Des transducteurs sans focalisation plans pour les concepts A, B ou C liés à la position de l'**hydrophone** ou un transducteur à focalisation pour les concepts D ou E liés à la position de l'**hydrophone** peuvent être utilisés. Selon le concept de forme d'onde choisi, il doit être en mesure de produire l'amplitude nécessaire (rapport signal sur bruit adéquat dans le signal de l'**hydrophone**) aux valeurs de fréquence étudiées. Cette exigence concerne l'amplificateur qui contrôle le transducteur. Le transducteur doit être provisoirement stable et ne doit pas être à l'origine d'un réchauffement du bain d'eau supérieur aux limites acceptables de dérive en température.

Il est recommandé de procéder à la vérification suivante avant chaque mesurage: dans tous les cas où des salves ou des impulsions sont appliquées (concepts de forme d'onde temporelle a, b, c), il convient d'observer le signal de sortie de l'**hydrophone** lorsque la distance entre le transducteur et l'**hydrophone** varie de plusieurs millimètres, afin d'assurer l'absence de plusieurs échos entre le transducteur et l'**hydrophone** à partir du signal reçu. Si ces échos gênent le signal reçu, une solution peut être de modifier la fréquence de répétition des impulsions.

12.4.2 Signal d'entraînement du transducteur source

L'amplitude du signal d'entraînement du transducteur source doit être stable à ± 1 %. Sa fréquence centrale doit être stable à $\pm 0,1$ %.

12.4.3 Système de mesure

Le système de mesure doit être conforme aux exigences de l'Article 6, de l'Article 7 et de l'Article 8.

12.5 Procédure

12.5.1 Mesurages (Type I): détermination de la réponse directionnelle d'un hydrophone

Placer l'**hydrophone** dans le réservoir d'eau et dans le champ du transducteur source, selon le concept choisi de position de l'**hydrophone** (voir l'Annexe G), le **centre de référence de l'hydrophone** étant placé sur l'**axe du faisceau** du transducteur. Indiquer la configuration de mesure avec un dispositif mécanique qui permet à l'**hydrophone** de pivoter autour d'un axe perpendiculaire à l'**axe du faisceau**, et ce indépendamment des deux axes de rotation perpendiculaires l'un à l'autre. L'incrément angulaire doit être choisi de manière à s'assurer que la variation entre les points adjacents de la **réponse directionnelle** ne dépasse pas 1 dB.

L'**hydrophone** doit être tourné de manière à maintenir son **centre de référence** au même emplacement dans le champ ultrasonique, conformément aux exigences liées à l'exactitude de la position de l'Article 6.

NOTE 1 Dans le cas des **hydrophones** à membrane nue, il est possible de vérifier si l'**hydrophone** pivote réellement autour de son centre en le faisant pivoter à 180° et en observant le décalage qui en résulte de l'instant d'arrivée de l'onde ultrasonore. Pour les **hydrophones** à aiguille, un montage particulier peut être utilisé, qui assure la rotation par rapport au **centre de référence**.

NOTE 2 L'alignement de l'axe de rotation et de l'élément actif peut être vérifié pour tout type d'**hydrophone** en mesurant les formes d'ondes d'essai à impulsions courtes et en observant le décalage de l'instant d'arrivée qui en résulte pendant la rotation. Des considérations de symétrie peuvent alors être utilisées pour déduire les corrections de positionnement nécessaires. L'essai peut être répété jusqu'à ce que les décalages temporels soient réduits le plus possible, ce qui indique enfin un positionnement correct [28].

Le mesurage peut être réalisé de deux manières: mesurer la tension de sortie de l'**hydrophone** en fonction de l'angle de rotation à une fréquence constante, ou mesurer la tension de sortie de l'**hydrophone** en fonction de la fréquence à un angle de rotation constant, et ce pour plusieurs valeurs d'angle de rotation. Dans ce dernier cas, réorganiser les données obtenues pour de nouveau obtenir la tension de sortie de l'**hydrophone** en fonction de l'angle de rotation à une fréquence constante. Diviser la tension de sortie de l'**hydrophone** mesurée par celle obtenue dans l'orientation de la tension de sortie maximale.

Utiliser les mesurages de la **réponse directionnelle** pour déterminer la **taille efficace de l'hydrophone** au moyen de l'approche décrite dans l'IEC 62127-3:2022, 5.6. Déterminer la **réponse directionnelle** et la **taille efficace de l'hydrophone** avec trois fréquences au minimum conformément à l'IEC 62127-3:2022, 5.5.2. La vitesse réelle du son est exigée pour déterminer la **taille efficace de l'hydrophone** à partir des mesurages de la **réponse directionnelle**. Il est donc nécessaire d'enregistrer la température de l'eau à laquelle la **réponse directionnelle** a été mesurée.

NOTE 3 Les valeurs de la vitesse du son c dans l'eau en fonction de la température de cette dernière sont répertoriées à l'Annexe E.

NOTE 4 La **taille efficace de l'hydrophone** est importante pour évaluer les effets de la moyenne spatiale (voir l'Annexe J et l'IEC 62127-1). La **taille efficace de l'hydrophone** peut dépendre de la fréquence pour certains types d'**hydrophones**. De même, elle peut dépendre de l'axe choisi pour tout **hydrophone** particulier. De plus amples informations sur la **taille efficace de l'hydrophone** peuvent être obtenues dans l'IEC 62127-3.

12.5.2 Mesurages (Type II): étalonnage par comparaison à l'aide d'un hydrophone normalisé

Ce type implique une série de mesurages, dans laquelle les **hydrophones** sont placés l'un après l'autre dans le champ ultrasonique. La série minimale doit comprendre deux mesurages, à savoir un mesurage avec chaque **hydrophone**. Toutefois, il est recommandé de mesurer au moins une nouvelle fois le premier **hydrophone** après le troisième (pour un total de trois mesurages) afin de vérifier la stabilité du champ acoustique appliqué. Une série de cinq mesurages uniques ou plus constitue même une meilleure solution.

Dans chaque mesurage unique, positionner l'**hydrophone** concerné dans le réservoir d'eau et dans le champ du transducteur source, à l'emplacement prévu selon le concept choisi de position de l'**hydrophone** (voir l'Annexe G). Optimiser le signal de sortie par un réglage latéral et rotatif de l'**hydrophone**.

Le **centre de référence** de l'**hydrophone** concerné doit être positionné dans le champ ultrasonique exactement à l'emplacement pertinent choisi pour cette série de mesurages, conformément aux exigences liées à l'exactitude de la position de l'Article 6. Indiquer la configuration de mesure avec les moyens mécaniques pour rendre ce placement possible. Une autre procédure utile consiste à observer le temps de vol (durée de propagation) de la salve ou de l'impulsion ultrasonore comme un indicateur de la distance entre le transducteur et l'**hydrophone**.

Mesurer la tension de sortie de l'**hydrophone** en fonction de la fréquence, puis la prendre en considération par rapport aux résultats obtenus avec l'autre **hydrophone**.

Si les mesurages sur les deux **hydrophones** ne sont pas effectués dans les mêmes conditions de charge électrique, l'indiquer clairement et spécifier les prescriptions de calcul du rapport de sensibilité de l'**hydrophone** pour les mêmes conditions de charge.

12.6 Taille maximale de l'hydrophone

Pour éviter les erreurs de mesure dues à la moyenne spatiale dans les mesurages spécifiés au 12.5, la **taille efficace** ne doit pas dépasser une limite $a_{\max}$ qui dépend des caractéristiques détaillées du mesurage réel selon la description de l'Annexe J.

S'il n'est pas possible de respecter cette exigence, un rayon d'**hydrophone** plus grand peut être utilisé dans une situation particulière, à savoir dans le mesurage de Type II, si la valeur de la **taille efficace** des deux **hydrophones** à comparer est identique à ± 5 %.

Si ces deux exigences ne sont pas respectées, une correction théorique peut, dans la mesure du possible, être appliquée aux résultats obtenus, mais cela doit être clairement indiqué et expliqué, et la référence aux formules utilisées doit être mentionnée.

Annexe A (informative)

Évaluation de l'incertitude dans l'étalonnage en champ libre des hydrophones

A.1 Généralités

Pour être pleinement significatif, il convient que le résultat d'un étalonnage soit accompagné de son **incertitude** associée. Pour évaluer et exprimer l'**incertitude** dans l'étalonnage, il convient de suivre le Guide 98-3:2008 de l'ISO/IEC [10]. D'une manière générale, les composantes de l'**incertitude** sont regroupées en fonction du mode d'estimation des valeurs:

- Type A: valeurs déterminées de manière statistique;
- Type B: valeurs déterminées par d'autres moyens.

A.2 Incertitude (élargie) globale

Il convient d'obtenir l'**incertitude** globale à partir de toutes les composantes d'**incertitude** de la manière décrite dans le Guide 98-3:2008 de l'ISO/IEC [10].

Lors de la combinaison des composantes de l'**incertitude**, il convient d'exprimer avec attention les valeurs des composantes en décibels. Avant de procéder à la combinaison, il convient idéalement d'exprimer les valeurs sous forme linéaire (en pourcentage ou en unité de grandeur, par exemple) et pas en décibels. La valeur finale de l'**incertitude** élargie peut être exprimée dans les unités de grandeur, en pourcentage ou convertie en décibels selon les exigences.

Noter que l'utilisation de décibels pour exprimer les **incertitudes** peut conduire à des distributions asymétriques (par exemple, +1,5 dB équivaut à +19 %, mais -1,5 dB équivaut à -16 %).

Lorsque chaque composante de l'**incertitude** est faible, c'est-à-dire inférieure à 1 dB, l'**incertitude** globale peut être calculée à l'aide des décibels.

A.3 Sources communes d'incertitude

La liste des sources communes d'**incertitude** dans l'étalonnage des **hydrophones** est donnée ci-dessous. Il convient de ne pas considérer cette liste comme exhaustive. Cependant, elle peut être utilisée comme guide d'évaluation des incertitudes dans le cadre d'une mise en œuvre spécifique d'une méthode d'étalonnage. Selon la méthode d'étalonnage choisie et sa mise en œuvre, certaines de ces sources (dans la mesure du possible, pas toutes) exigent une évaluation. Par exemple, les erreurs des instruments de mesure peuvent être réduites le plus possible par l'utilisation d'un même canal de mesure (amplificateur, filtre, voltmètre, etc.) pour tous les signaux et par le mesurage des seuls rapports d'amplitude. Toutefois, puisqu'il est possible que cela ne soit pas le cas dans toutes les mises en œuvre, les composantes de ces sources d'erreur ont été incluses dans la liste.

Sources d'**incertitude** spécifiques aux étalonnages par réciprocité en **champ libre**:

- inexactitude des hypothèses relatives au champ acoustique (par exemple, qu'il s'agit d'un champ à ondes sphériques);
- erreurs de mesure de la distance de séparation;
- erreurs dans les valeurs de la fréquence acoustique;
- erreurs dans les valeurs de la densité de l'eau.

Sources d'**incertitude** spécifiques aux étalonnages par comparaison:

- erreurs d'étalonnage de l'**hydrophone** de référence (source d'erreur principale dans l'étalonnage par comparaison);
- instabilité à court terme des transducteurs de référence utilisés pour les étalonnages par comparaison (instabilité de la sortie d'un transducteur utilisé comme source de référence dans un étalonnage par comparaison, par exemple);
- instabilité de l'**hydrophone** de référence dans les étalonnages par comparaison (c'est-à-dire la variation de sensibilité de l'**hydrophone** de référence depuis l'étalonnage absolu précédent);
- différences de conditions d'environnement pour l'étalonnage par comparaison à celles effectives de l'étalonnage absolu de l'**hydrophone** de référence, susceptibles de modifier la sensibilité dudit **hydrophone** (température, trempage, caractéristiques détaillées du montage de l'**hydrophone**, etc.);
- inexactitude des hypothèses relatives au champ acoustique produit par une source de référence (par exemple, qu'il s'agit d'un champ à ondes sphériques);
- erreurs de positionnement des **hydrophones** au même point à l'intérieur du champ acoustique;
- instabilité des conditions de commande électrique du transducteur de référence, y compris son manque de linéarité s'il est commandé par un signal différent de celui utilisé lors de son propre étalonnage absolu;
- différences de conditions d'environnement pour l'étalonnage par comparaison à celles effectives de l'étalonnage absolu du transducteur de référence, susceptibles de modifier la sensibilité dudit transducteur (température, longueur de la période d'immersion, caractéristiques détaillées du montage).

Sources d'**incertitude** communes à toutes les méthodes susmentionnées:

- interférence liée aux réflexions acoustiques, conduisant à un manque de conditions en **champ libre**;
- manque de conditions en **champ lointain** acoustique;
- effets de la moyenne spatiale des **hydrophones** en cours d'étalonnage en raison de leur taille déterminée et du manque de conditions d'onde plane parfaites;
- défaut d'alignement, particulièrement à des fréquences élevées auxquelles la réponse de l'**hydrophone** peut ne pas être omnidirectionnelle;
- diffusion acoustique à partir du montage de l'**hydrophone** (ou vibrations relevées et diffusées par le montage);
- erreurs de mesure de la tension reçue (y compris l'exactitude des instruments de mesure, à savoir le voltmètre, les numériseurs, etc.);
- inexactitude des gains de tous les amplificateurs, filtres et numériseurs utilisés;
- erreurs de mesure du courant ou de la tension d'attaque;
- erreurs dues au manque de linéarité du système de mesure (l'utilisation d'un affaiblisseur étalonné pour égaliser les signaux mesurés peut réduire cette contribution de manière significative);
- inexactitude des affaiblisseurs de signaux électriques utilisés;
- bruit électrique, y compris le capteur de radiofréquence;
- inexactitude des corrections de charge électrique réalisées pour tenir compte de la charge par câbles d'extension et préamplificateurs;
- bulles ou présence d'air dans les transducteurs (il convient de réduire le plus possible ce phénomène par un mouillage et un trempage adéquats des transducteurs);
- conditions d'environnement (température de l'eau, par exemple). Il n'est pas nécessaire d'inclure les corrections de ces conditions si les résultats de l'étalonnage définissent les conditions et indiquent que l'étalonnage est uniquement valide pour les conditions spécifiées.

Annexe B (informative)

Comportement des capteurs polymères PVDF dans les champs ultrasoniques à haute intensité

B.1 Généralités

Les champs ultrasoniques à haute intensité sont généralement utilisés pour les applications biomédicales des ultrasons, et il est à présent bien établi que ces champs à haute amplitude sont à l'origine de phénomènes non linéaires, y compris la déformation de l'onde et de la génération d'harmoniques dans le milieu de propagation [29],[30],[31]. Il a déjà été démontré que les sondes polymères ultrasoniques étalonnées à large bande, à membrane ou à aiguille sont les **hydrophones** les mieux adaptés aux mesurages les plus précis des champs ultrasoniques, et les paramètres de base des **hydrophones** (la réponse en fréquence, la **réponse directionnelle** et la sensibilité en tension, par exemple) ont par ailleurs été décrits [32]. Toutefois, les informations relatives à la linéarité de la réponse des **hydrophones** sont plutôt limitées. La linéarité est un sujet d'importance particulière pour les applications médicales. Les appareils de diagnostic modernes sont capables de générer des amplitudes de pression instantanées de l'ordre de 10 Mpa [33]. Ces amplitudes présentent un ordre d'amplitude inférieure à celles rencontrées dans la région focale des générateurs d'ondes de choc extracorporelles (lithotriteurs).

En outre, la linéarité de la réponse en pression de l'**hydrophone** est essentielle pour l'utilisation de méthodes d'étalonnage non linéaire [34].

Les essais décrits à l'Article B.3 ont été effectués afin de déterminer la linéarité des **hydrophones** à ultrasons en polymère PVDF. Une description partielle des résultats présentés a été publiée dans [35].

B.2 Contexte théorique

La théorie des ondes acoustiques d'amplitude finie a de nombreuses applications dans le domaine de l'acoustique sous-marine et aérienne [29]. Plus récemment, les implications des phénomènes de propagation non linéaire dans la plage de fréquences de l'imagerie biomédicale ont été soulignées [30],[31].

Il est bien connu que le degré de déformation des ondes dépend de la distance de la source [29]. Cette relation représente un critère pratique de distinction des déformations de l'onde dues aux phénomènes de propagation non linéaire, c'est-à-dire la non-linéarité des formules différentielles sous-jacentes et du milieu de propagation (ici, l'eau). Ce même critère pratique permet de distinguer les déformations susmentionnées des déformations de l'onde associées à la réponse non linéaire de l'**hydrophone** à la pression, ou à la réponse non linéaire possible de l'émetteur ou de la source acoustique à l'excitation en tension. Cette théorie a été utilisée dans les essais décrits à l'Article B.3 afin de s'assurer que la non-linéarité observée n'était pas associée à une fonction de transfert électroacoustique non linéaire possible.

B.3 Essais

Tous les mesurages décrits ici ont été effectués dans de l'eau distillée et dégazée à une température de $21,0\text{ °C} \pm 0,1\text{ °C}$. Le montage expérimental a utilisé différentes sources ultrasonores qui fonctionnent dans la plage de fréquences comprise entre 2,25 MHz et 10 MHz, ainsi que des **hydrophones**, y compris à aiguille et à membrane [32],[36]. De plus, un dispositif optoacoustique capable de générer des ondes de choc a été utilisé [37],[38]. Alors que les sources ultrasonores ont permis de générer des amplitudes de pression de l'ordre de 5,5 MPa [correspondant à des intensités instantanées (à la crête spatiale et temporelle) de l'ordre de $1\,000\text{ W cm}^{-2}$], la source optoacoustique a généré des ondes de choc dont les amplitudes de compression à la crête sont supérieures à 10 MPa.

Ces deux sources et les **hydrophones** ont été soigneusement alignés à l'aide d'un système micromanipulateur x - y - z . Le signal détecté par l'**hydrophone** a été transmis à un analyseur de spectre, puis affiché sur son écran afin de déterminer le résidu harmonique. Par ailleurs, le signal a également été observé sur un oscilloscope, et des photographies des formes d'onde de propagation ont été prises, chacune correspondant à différentes distances de la source axiale.

Préalablement à chaque groupe de mesurages, il a été vérifié que la déformation des ondes était due aux phénomènes de propagation non linéaire, et n'était pas le résultat de la dépendance non linéaire d'un port acoustique (surface émettrice) par rapport à la tension d'excitation. Comme cela est mentionné ci-dessus, la vérification s'est appuyée sur le fait que la déformation des ondes acoustiques dépend de la distance par rapport à la source et a impliqué l'enregistrement de l'impulsion émise à différentes distances axiales. Ces mesurages ont été réalisés à l'aide d'**hydrophones** à aiguille et à membrane nue [32],[36].

Trois méthodes différentes ont été utilisées pour déterminer la linéarité de la réponse des **hydrophones** en fonction de l'augmentation de la pression acoustique.

Dans la première procédure, la linéarité des **hydrophones** à aiguille étalonnés a été vérifiée par essai. Il s'agissait d'observer l'augmentation de la tension de sortie des sondes de 0,6 mm et 1 mm de diamètre avec augmentation de l'excitation des transducteurs sources. La pression de compression à la crête maximale mesurée par les **hydrophones** dans la région focale des transducteurs utilisés était d'environ 5 MPa à une fréquence de 3 MHz.

La deuxième procédure impliquait le mesurage de la puissance acoustique totale générée par une source donnée. Des **hydrophones** polymères miniatures à aiguille ou à membrane étalonnés ont été utilisés pour balayer le champ, et la puissance totale rayonnée a été calculée [39]. Les résultats des calculs ont été ensuite comparés à ceux des mesurages réalisés aux mêmes emplacements du champ avec une balance de forces de rayonnement acoustique. Ces mesurages ont été réalisés dans la plage de fréquences comprise entre 1 MHz et 2 MHz afin de réduire le plus possible les erreurs dues aux effets de la moyenne spatiale.

La troisième procédure impliquait l'utilisation d'un convertisseur optoacoustique. Un précédent travail [40],[41],[42] mené sur des appareils chirurgicaux à ultrasons plus conventionnels a révélé qu'il convient que ce type de dispositif produise un champ divergent avec des amplitudes de pression qui diminuent selon la loi (distance)⁻¹.

NOTE Les expressions "loi (distance)⁻¹" ou "comportement (distance)⁻¹" signifient que le comportement de l'amplitude de la pression est proportionnel à la distance réciproque, lorsque la distance entre la source et le point du champ pris en considération augmente.

B.4 Résultats

Les mesurages de linéarité décrits ici ont été effectués à l'aide de 30 **hydrophones** [32] à aiguille de 1 mm et 0,6 mm de diamètre, et environ 10 **hydrophones** à membrane [32],[36].

Dans la première procédure, comme cela est mentionné ci-dessus, la linéarité des **hydrophones** à aiguille étalonnés a été vérifiée par essai, en augmentant progressivement la tension d'excitation du transducteur source à 3 MHz et en mesurant l'augmentation correspondante de la tension de sortie des **hydrophones** à aiguille de 0,6 mm et 1 mm de diamètre. Un tracé de la tension d'excitation par rapport au signal de l'**hydrophone** a indiqué une relation linéaire.

Dans la deuxième procédure, des **hydrophones** polymères miniatures à aiguille ou à membrane étalonnés ont été utilisés pour balayer le champ, et la puissance totale rayonnée a été calculée [39]. Les résultats des calculs ont été ensuite comparés à ceux des mesurages réalisés aux mêmes emplacements du champ avec une balance de forces de rayonnement acoustique. Pour la même source acoustique (1,5 MHz ou 2,25 MHz), la divergence entre la puissance acoustique telle qu'elle est mesurée par la balance de forces de rayonnement et celle déterminée à l'aide de la méthode de balayage planaire était d'environ 22 %.

La troisième procédure impliquait des mesurages réalisés à la sortie d'un convertisseur optoacoustique. Dans la plage de fréquences comprise entre 1 MHz et 10 MHz, les formes d'onde générées par les sources sonores observées ont indiqué une caractéristique de forme des phénomènes de propagation non linéaire associés aux propriétés non linéaires du milieu de propagation. Les dispositifs optoacoustiques ont généré des formes d'onde analogues à celles rencontrées dans la région focale des lithotriteurs du commerce. Le comportement $(\text{distance})^{-1}$ des dispositifs a été confirmé de manière expérimentale: l'amplitude maximale de pression mesurée était de l'ordre de 10 Mpa, et l'écart des caractéristiques $(\text{distance})^{-1}$ se situait dans les limites de l'**incertitude** expérimentale (15 %) [38].

Toute divergence par rapport à la loi $(\text{distance})^{-1}$ qui dépasse l'**incertitude** globale des mesurages implique une possibilité de non-linéarité dans la réponse de l'**hydrophone**. Toutefois, aucune divergence de ce type n'a été observée avec les **hydrophones** à aiguille et à membrane [38].

B.5 Conclusions

La linéarité de la réponse en pression d'un certain nombre d'**hydrophones** polymères PVDF a été déterminée. Les mesurages ont été réalisés à des niveaux d'amplitude de pression de l'ordre de 10 MPa. Différentes procédures d'essai ont été utilisées, et les résultats obtenus à l'aide de transducteurs acoustiques ont démontré que les non-linéarités observées étaient clairement liées à la propagation de l'onde uniquement. Un excellent compromis a été obtenu entre les différentes conceptions de l'**hydrophone** polymère à aiguille et à membrane nue.

En outre, aucune divergence par rapport à la loi $(\text{distance})^{-1}$ qui dépasse l'**incertitude** globale des mesurages n'a été observée avec les **hydrophones** à aiguille et à membrane. Comme cela est mentionné à l'Article B.4, une telle divergence implique une non-linéarité de la réponse en pression avec une augmentation de la pression acoustique.

Dans les essais décrits à l'Article B.3, les amplitudes de pression ont été limitées à environ 10 MPa. D'autres éléments, à l'appui des résultats décrits à l'Article B.4, émergent des essais des **hydrophones** conçus spécialement pour les applications acoustiques sous-marines [43],[44]. Des modifications négligeables, de l'ordre de 0,6 dB, de la réponse en fréquence des **hydrophones** ont été observées jusqu'à des pressions hydrostatiques de 69 MPa.

Selon les résultats de ces essais préliminaires et les informations publiées dans [43],[44], il peut être conclu que les **hydrophones** polymères présentent une excellente linéarité sur une plage d'intensités représentatives de celles rencontrées dans les systèmes d'imagerie par écho d'impulsion [33].

De plus, les formes d'onde pression-temps mesurées dans la région focale des lithotriteurs ne présentent pas de comportement imprévisible. Les pressions rencontrées dans la région focale de ces lithotriteurs peuvent être de l'ordre de 100 MPa, et la forme des ondes de choc mesurées peut rester inchangée avec la diminution de la tension d'excitation ou de la tension appliquée aux électrodes du système électrohydraulique. D'autre part, même si ces éléments ne représentent pas une preuve irréfutable qui vient à l'appui de la réponse linéaire du matériau PVDF, aucun élément probant ne démontre actuellement la présence d'une non-linéarité de la réponse en pression d'un **hydrophone** PVDF à ultrasons correctement conçu dans une plage allant jusqu'à environ 70 MPa.

Annexe C (informative)

Corrections de charge électrique

C.1 Généralités

La sensibilité d'un **hydrophone** est souvent spécifiée comme la **sensibilité en circuit ouvert en bout de câble**. Il s'agit de la sensibilité de l'**hydrophone** à l'extrémité de son câble lorsqu'il n'est pas connecté à une charge électrique. Lorsqu'une charge électrique spécifique (un oscilloscope, un amplificateur ou un câble supplémentaire, par exemple) est utilisée à la sortie de l'**hydrophone**, la **sensibilité en bout de câble** de l'**hydrophone** peut être associée à la **sensibilité en circuit ouvert en bout de câble** de la manière suivante.

C.2 Corrections à l'aide de l'impédance complexe

Soit le cas général d'un **hydrophone** considéré comme un bipôle de l'impédance de sortie électrique complexe d'un **hydrophone**, $\underline{Z}_H$, connecté à une **impédance de charge électrique** complexe $\underline{Z}_L$. La **sensibilité en bout de câble** de l'**hydrophone**, $\underline{M}_L$, lorsqu'il est connecté à la charge spécifiée, est associée à la **sensibilité en circuit ouvert en bout de câble**, $\underline{M}_c$, par l'équation suivante:

$$\underline{M}_L = \underline{M}_c \frac{\underline{Z}_L}{\underline{Z}_L + \underline{Z}_H} \quad (\text{C.1})$$

Alors, le module de la **sensibilité en bout de câble** de l'**hydrophone**, $|\underline{M}_L|$, lorsqu'il est connecté à la charge spécifiée, est associé au module de la **sensibilité en circuit ouvert en bout de câble**, $|\underline{M}_c|$, par l'équation suivante:

$$|\underline{M}_L| = |\underline{M}_c| \sqrt{\frac{\text{Re}(\underline{Z}_L)^2 + \text{Im}(\underline{Z}_L)^2}{[\text{Re}(\underline{Z}_L) + \text{Re}(\underline{Z}_H)]^2 + [\text{Im}(\underline{Z}_L) + \text{Im}(\underline{Z}_H)]^2}} \quad (\text{C.2})$$

où $\text{Re}(\)$ et $\text{Im}(\)$ indiquent les parties réelle et imaginaire de l'impédance complexe correspondante. Souvent, la charge électrique peut être considérée comme une combinaison parallèle d'une résistance, R_L , et d'une capacité électrique, C_L . Dans ce cas, $\text{Re}(\underline{Z}_L)$ et $\text{Im}(\underline{Z}_L)$ sont donnés par

$$\text{Re}(\underline{Z}_L) = \frac{R_L}{1 + \omega^2 C_L^2 R_L^2} \quad (\text{C.3})$$

et

$$\operatorname{Im}(\underline{Z}_L) = \frac{-\omega C_L R_L^2}{1 + \omega^2 C_L^2 R_L^2} \quad (\text{C.4})$$

où

ω est la fréquence circulaire.

C.3 Corrections à l'aide des capacités électriques uniquement

Une simplification approfondie est possible si les impédances de l'**hydrophone** et de la charge peuvent être considérées comme capacitives. Cette hypothèse est souvent valide pour un **hydrophone** à des fréquences bien inférieures à la fréquence de résonance et pour des charges telles que des câbles d'extension. Dans ce cas, si C_H est la capacité électrique en bout de câble de l'**hydrophone**, y compris un câble intégré et un connecteur, la Formule (C.2) est ramenée à

$$|\underline{M}_L| = |\underline{M}_c| \left[\frac{C_H}{C_H + C_L} \right] \quad (\text{C.5})$$

Annexe D (informative)

Étalonnage absolu des hydrophones à l'aide de la technique de balayage planaire

D.1 Vue d'ensemble

La présente Annexe D donne une description détaillée de la méthodologie relative à l'étalonnage des **hydrophones** à l'aide de la technique de balayage planaire. Elle fournit également des recommandations sur les options de balayage mécanique de l'**hydrophone** et sur l'évaluation des sources importantes d'**incertitude** d'étalonnage.

D.2 Méthodologie de balayage de l'hydrophone

Plusieurs méthodes permettent de balayer l'**hydrophone** sur le plan $z = l$ dans le faisceau ultrasonore. La méthode la plus complète consiste à obtenir une matrice rectangulaire des points d'échantillonnage par déplacement de l'**hydrophone** dans un balayage de trame à deux dimensions. Dans ce cas:

$$\iint [U_L(x, y, l, t)]^2 dy dx \approx \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [U_L(x_m, y_n, l, t)]^2 \Delta y \Delta x \quad (D.1)$$

où

M et N représentent le nombre de points d'échantillonnage dans les directions y et x ; et
 Δx et Δy sont les dimensions du pas dans les directions x et y , respectivement.

Une autre procédure de balayage est possible si le profil du faisceau en provenance du transducteur peut être considéré comme à peu près symétrique du point de vue cylindrique. Dans ce cas, un certain nombre de **balayages diamétraux de faisceau** peut être effectué. Il convient que ces balayages passent par le **centre du faisceau** ultrasonore et qu'ils soient espacés par incréments angulaires égaux. Par exemple, si deux balayages sont réalisés, il convient qu'ils soient espacés de 90°. Pour N **balayages diamétraux de faisceau**:

$$\iint [U_L(x, y, l, t)]^2 dy dx \approx \left(\frac{\pi}{N} \right) \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{r=R_{1i}}^{R_{2i}} [U_L(l, r)]^2 r \Delta r + [U_L(l, s)]^2 \left(\frac{\Delta r}{2} - s \right)^2 \right\} \quad (D.2)$$

où

r est la distance de chaque point de balayage par rapport au **centre du faisceau** ultrasonore $(y^2 + x^2)^{1/2}$ si le **centre du faisceau** est choisi à l'origine du système de coordonnées y, x ;

Δr est la dimension du pas;

R_{1i} et R_{2i} représentent les distances entre le **centre du faisceau** et les extrêmes du i^{e} **balayage diamétral de faisceau**;

s est la distance entre le **centre du faisceau** ultrasonore et le point de balayage le plus proche.

Le second terme de la partie droite de la Formule (D.2) représente la contribution à l'intégrale totale à partir du **centre du faisceau** ultrasonore.

NOTE La Formule (D.2) n'implique pas qu'un point de balayage coïncide avec le **centre du faisceau** ou que les points de balayage soient équidistants du **centre du faisceau**.

D.3 Corrections et sources d'incertitude de mesure

D.3.1 Puissance totale

Dans le cas des mesurages indiqués à l'Article 10, l'**hydrophone** est placé à une distance $z = l$ du transducteur. Il convient de corriger la puissance de sortie ultrasonore totale émise par le transducteur, P_o , (par hypothèse, $z = 0$) à l'aide de l'expression ci-dessous, pour tenir compte de l'atténuation du parcours de l'eau:

$$P(l) = P_o \exp(-2\alpha z) \quad (D.3)$$

où

P_o est la puissance de sortie ultrasonore totale émise par un transducteur;

$P(l)$ est la puissance totale dans le faisceau ultrasonore au niveau de l'**hydrophone**;

α est le coefficient d'atténuation de l'amplitude des ondes planes dans un milieu (généralement de l'eau).

L'Annexe E fournit les valeurs de l'atténuation dépendant de la température et de la fréquence à utiliser dans la Formule (D.3).

La valeur comporte trois sources d'**incertitude** pour la puissance totale dans le faisceau ultrasonore au niveau de l'**hydrophone** $P(l)$, et il convient d'estimer chacune d'elles. En premier lieu, il existe une **incertitude** systématique dans la détermination de la puissance de sortie totale, P_o , d'un transducteur normalisé ou d'un transducteur dont la puissance de sortie a été mesurée à l'aide de la technique de mesure par forces de rayonnement (voir l'IEC 61161).

La deuxième source d'**incertitude** résulte de possibles différences entre la puissance de sortie totale du transducteur lors de la procédure de balayage du faisceau et la puissance de sortie mesurée ou définie par hypothèse (pour un transducteur normalisé). L'amplitude de cette **incertitude** peut être évaluée à partir des connaissances préalables en matière de stabilité du transducteur. Il convient de déterminer cette **incertitude** séparément pour chaque transducteur utilisé.

La source finale d'**incertitude** dans la détermination de la puissance totale résulte de la correction apportée à l'atténuation de l'eau. Le coefficient d'atténuation α/f^2 , qu'il convient de représenter à $\pm 1,7$ % à toutes les températures (voir [45] et [46]), et la détermination de la distance l entre le transducteur et l'**hydrophone** présentent des incertitudes. Cet écart peut être déterminé en mesurant le délai enregistré sur un oscilloscope entre l'excitation du transducteur ultrasonique et la réception du signal au niveau de l'**hydrophone**.

D.3.2 Signal reçu de l'hydrophone

Généralement, l'amplitude du signal de l'**hydrophone** $U_L(x, y, l, t)$ est déterminée à l'aide d'un oscilloscope, d'un numériseur ou d'un autre système approprié, et il convient de déterminer l'**incertitude** de mesure de ce signal. L'**incertitude** dépend du résidu harmonique du signal de l'**hydrophone**, de la réponse en fréquence de l'**hydrophone** et de la méthode utilisée pour déterminer le signal de l'**hydrophone**.

Il a été démontré que le balayage planaire réalisé sur des ondes déformées se traduit par d'importantes erreurs d'étalonnage [47]. Ces erreurs sont plus importantes si la pression acoustique positive de crête est utilisée pour mesurer le signal de l'**hydrophone**. Elles le sont moins si la pression acoustique crête à crête ou de raréfaction de crête est utilisée.

D.3.3 Intégration

Il est fondamental que la technique de balayage planaire permette un échantillonnage adapté du faisceau. Pour les **balayages diamétraux de faisceau**, et sur l'hypothèse d'une symétrie cylindrique, une analyse analogue à celle de [45] peut permettre de démontrer que l'**incertitude** de la sensibilité de l'**hydrophone** du fait de l'intégration numérique est inférieure à 1 %. Cette analyse est effectuée sous réserve qu'il y ait au moins sept points d'échantillonnage entre (et y compris) les deux points à 6 dB sous la crête du profil du faisceau de pression acoustique (ou cinq points entre les points à 6 dB sur le profil de pression au carré). Si la technique du balayage de trame est utilisée, et si M et N de la Formule (D.1) sont choisis de sorte que les balayages de faisceau qui passent par le centre du faisceau dans les directions y et x contiennent au moins sept points d'échantillonnage entre (et y compris) les deux points à 6 dB sous la crête du profil du faisceau de pression acoustique, il peut être démontré que l'**incertitude** de la sensibilité de l'**hydrophone** du fait de l'intégration numérique est inférieure à 1 %. L'**incertitude** provoquée par un nombre fini de points d'échantillonnage doit être évaluée.

Dans le cas de **balayages diamétraux de faisceau**, l'hypothèse d'une symétrie cylindrique peut être vérifiée par essai par une analyse séparée des données issues de chaque partie radiale du balayage dans la Formule (D.4):

$$\sum_{j=0}^{j_{\max}} [U_L(l, r, j)]^2 r_j \Delta r \quad (\text{D.4})$$

où

r_j est la distance entre le **centre du faisceau** ultrasonore et le point de balayage le plus proche;

$j_{\max}$ est le numéro du point de balayage le plus éloigné d'un balayage radial.

NOTE Il est admis par hypothèse que chaque balayage diamétral a été décomposé en deux balayages radiaux (ou demi-balayages), les données étant analysées séparément.

La différence de pourcentage entre les valeurs maximale et minimale doit être déterminée, et la moitié de cette valeur doit être utilisée pour déterminer l'**incertitude** introduite par l'hypothèse d'une symétrie cylindrique lorsque des **balayages diamétraux de faisceau** sont utilisés.

D.3.4 Réponse directionnelle

Une correction de la **réponse directionnelle** de l'**hydrophone** doit être effectuée par calcul, sauf si la **réponse directionnelle** de l'**hydrophone** n'est pas prévisible. Dans ce dernier cas, la procédure doit consister à modifier l'angle de l'**hydrophone** pour obtenir une tension de sortie maximale à chaque point du balayage. Il est possible qu'il ne soit pas essentiel d'optimiser la rotation pour chaque position du balayage, plus particulièrement si l'écart entre les points d'échantillonnage représente une légère modification de l'angle d'incidence des ultrasons sur l'**hydrophone**. La procédure fondée sur un calcul doit être la suivante. En premier lieu, il convient de déterminer la **réponse directionnelle** de l'**hydrophone** à la fréquence f . Soit la fonction de **réponse directionnelle** normalisée $D(\theta_1)$, où θ_1 représente l'orientation angulaire. Pour corriger les mesurages mentionnés ci-dessus, le signal de l'**hydrophone**

$U_L(x, y, l, t)$ doit être divisé par le facteur $D(\theta_1)$, où $\theta_1 = \arctan \left[(x^2 + y^2)^{1/2} / l \right]$.

Les méthodes qui permettent de déterminer la **réponse directionnelle** des **hydrophones** sont spécifiées au 12.5.

D.3.5 Taille finie de l'hydrophone

L'**incertitude** provoquée par la taille finie de l'élément actif de l'**hydrophone** doit être évaluée. Un **hydrophone** répond à l'intégrale de la pression acoustique sur son élément actif. Par conséquent, il peut s'avérer nécessaire de corriger la moyenne spatiale [13],[14],[48],[49],[50]. Une évaluation de l'amplitude de cette correction doit être obtenue par calcul de la différence entre la pression acoustique en un point du champ et la moyenne de la pression sur la surface de l'**hydrophone** ([48], IEC 62127-1). Pour les besoins de ce calcul, la surface utile de l'**hydrophone** doit être utilisée pour définir l'étendue de la surface de l'**hydrophone**. La surface utile peut être déterminée à partir de la **taille efficace** de l'élément actif de l'**hydrophone**, laquelle doit être déterminée par les procédures spécifiées au 12.5. Les contributions aux intégrations dans le processus de balayage planaire [Formule (15)] sont plus importantes à partir du centre du faisceau. Par conséquent, il suffit de déterminer l'**incertitude** et de procéder à une correction pour les zones proches du centre du faisceau ultrasonore. Il est habituellement préférable de réaliser des mesurages à une distance l du transducteur, de sorte que l'effet de la moyenne spatiale au centre du faisceau soit inférieur à 5 %.

D.3.6 Bruit

En général, l'**hydrophone** est balayé à une certaine distance de l'**axe du faisceau** ultrasonore tant qu'un signal n'est pas observé au-dessus du bruit. Pour corriger l'intégrale du carré du signal de l'**hydrophone** de manière à tenir compte de la contribution du bruit, le niveau de bruit doit d'abord être déterminé. Pour ce faire, l'ensemble du processus de balayage doit être répété avec le transducteur hors tension et le niveau efficace de bruit mesuré en chaque point. Le niveau efficace de bruit, $U_n(x, y, l)$, doit être soustrait des signaux mesurés de la manière suivante. Si la valeur moyenne du carré du signal de l'**hydrophone** est

$$\overline{[U_L'(x, y, l, t)]^2} \quad (D.5)$$

alors la valeur moyenne du signal de l'**hydrophone** après correction pour tenir compte de la contribution du bruit est

$$\overline{U_L(x, y, l, t)^2} = \overline{[U_L'(x, y, l, t)]^2} - U_n^2(x, y, l) \quad (D.6)$$

Si l'**hydrophone** est placé à la distance qui correspond à la limite du processus de balayage planaire, un signal ultrasonore inférieur au niveau de bruit peut être présent. Dans ce cas, l'amplitude de la contribution depuis l'extérieur de la zone de balayage (ignorée dans l'intégration) doit être déterminée à l'aide d'un modèle théorique du faisceau ultrasonore. Dans la zone du **champ lointain** d'une source circulaire à piston plan, la pression en un point R est proportionnelle à:

$$2J_1(ka_t \sin \theta) / (ka_t \sin \theta) \quad (D.7)$$

où

k est le nombre d'ondes circulaires;

a_t est le **rayon efficace d'un transducteur ultrasonique sans focalisation** (ou le rayon géométrique du transducteur ultrasonique sans focalisation);

θ est l'angle entre la droite qui relie le point R au centre du transducteur et l'**axe du faisceau**, voir également l'Article 4;

J_1 est une fonction de Bessel de premier ordre.

Ce modèle définit par hypothèse un balayage sphérique et, par conséquent, la contribution ignorée doit être déterminée par l'intégration de cette répartition théorique (au carré) sur une zone sphérique définie à partir de l'arête de la zone de balayage planaire et comparée à l'intégrale totale sur un hémisphère. La contribution à l'intégrale depuis l'extérieur de la zone de balayage en procédure de balayage planaire doit être considérée comme identique à celle obtenue à partir du modèle de balayage sphérique. Cette contribution doit être utilisée comme une correction apportée à l'intégration, et une **incertitude** égale à la correction doit être attribuée. Cette **incertitude** est en général limitée, par comparaison aux autres composantes.

Il peut être préférable de procéder à un balayage jusqu'à un certain seuil inférieur au signal de crête au centre du faisceau ultrasonore (par exemple, 10 % [43] ou 5 % [51]). Dans ce cas, la contribution depuis l'extérieur de la zone de balayage est significative, et un facteur de correction doit être déterminé à l'aide de la même procédure ci-dessus.

Le rayon géométrique du transducteur peut être utilisé en lieu et place du **rayon efficace d'un transducteur ultrasonique sans focalisation** si ce dernier n'est pas connu.

NOTE La signification de la contribution du bruit à l'intégration dépend de la méthode de mesure du signal de l'**hydrophone**.

D.3.7 Propagation non linéaire

La technique de balayage planaire détermine la sensibilité d'un **hydrophone** à une fréquence particulière f . Il est important que l'onde ultrasonore utilisée ne soit pas déformée par l'introduction de composantes à haute fréquence due à la propagation non linéaire. Pour estimer l'importance de la propagation non linéaire par rapport à la méthode d'étalonnage du balayage planaire, deux procédures sont données ici. Le choix de l'un ou l'autre dépend des procédures de mesure particulières et de l'**hydrophone** en cours d'étalonnage. En fait, les deux procédures partent du principe que l'**incertitude** générée par une déformation non linéaire dépend de la perte d'amplitude de la composante de fréquence fondamentale dans la forme d'onde de la pression acoustique. La première procédure part du principe que l'amplitude de la seconde harmonique représente un certain pourcentage, δ , de l'amplitude fondamentale. Dans ce cas, l'erreur de pourcentage dans la détermination de la sensibilité de l'**hydrophone** pour $\delta < 30 \%$ est (voir le D.4.5)

$$\frac{1}{2} \frac{\delta^2}{100} \quad (D.8)$$

Bien qu'il s'agisse d'une procédure simple, il peut ne pas être possible de déterminer δ de manière fiable, en raison de la variation de sensibilité de l'**hydrophone** entre les fréquences fondamentales et celles de la seconde harmonique ou parce que, à des fréquences élevées, l'atténuation acoustique dans l'eau n'a pas été prise en compte.

La seconde procédure part du principe que la propagation non linéaire peut être prévue dans le cas d'un transducteur ultrasonique à piston plan. Comme cela est indiqué au D.4.5, pour le **champ lointain** d'un transducteur qui émet une puissance ultrasonore totale P_0 dans des conditions à ondes entretenues, l'erreur de détermination de la sensibilité de l'**hydrophone** est d'environ:

$$P_0 (0,28R + 0,065) f^4 a_t^2 10^{-20} \quad (D.9)$$

avec

$$R = \lambda l / (\pi a_t^2) \quad (D.10)$$

où

f est la fréquence en hertz; et

a_t est le **rayon efficace d'un transducteur ultrasonique sans focalisation** en mètres.

Cette relation est exacte si l'erreur est inférieure à 5 % et si l'atténuation est de nouveau ignorée (voir l'Annexe E).

Les évaluations ci-dessus reposent sur l'hypothèse selon laquelle le signal à la fréquence de la seconde harmonique n'est pas détecté et l'effet de l'atténuation sur la propagation non linéaire est limité. Si un **hydrophone** à réponse horizontale est utilisé, alors cette analyse surestime l'erreur.

L'**incertitude** doit être évaluée à l'aide de la relation ci-dessus, et doit servir de limite supérieure de l'erreur provoquée par la déformation de l'onde du signal de l'**hydrophone**. L'erreur doit être inférieure à 5 %.

D.3.8 Balayage planaire

D'un point de vue strict, il convient que l'écart entre la Formule (15) et la Formule (11) se rapporte à une intégration sur une surface sphérique centrée au niveau du transducteur ultrasonique. L'erreur introduite par l'utilisation d'un balayage planaire en chaque point du

balayage est proportionnelle à $\left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)$, où θ est l'angle entre l'**axe du faisceau** ultrasonore

et la droite qui relie le centre du transducteur ultrasonique au **centre de référence** de l'élément actif de l'**hydrophone**. Sous réserve que θ au niveau des bords du balayage planaire soit inférieur à environ 10°, l'**incertitude** par rapport à l'utilisation d'un balayage planaire est négligeable [45]. Si l'angle est plus important, l'**incertitude** doit être évaluée.

D.3.9 Intensité proportionnelle à la pression au carré

La Formule (10) prend pour hypothèse que l'**intensité instantanée** est proportionnelle au carré de la pression acoustique. La différence entre l'**intensité instantanée** vraie, I , et l'**intensité instantanée dérivée** I_p , déduite du carré de la pression acoustique sur l'axe d'un transducteur ultrasonique circulaire à piston plan, peut être estimée à partir de la Formule [25] suivante:

$$\frac{I_p}{I} = \frac{2}{1 + \left(\frac{l}{a_t}\right) \left[1 + \left(\frac{l}{a_t}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{D.11})$$

Dans le cas des distances de mesure recommandées au 10.4.4 et de la plage des diamètres du transducteur généralement rencontrés (de 6 mm à 25 mm), ce rapport varie par rapport à l'unité de moins de 1 %. Si les distances choisies sont inférieures à celles recommandées au 10.4.4, la Formule (D.11) doit être utilisée pour évaluer la contribution à partir de cette source d'**incertitude**.

D.4 Justification concernant la technique de balayage planaire pour l'étalonnage des hydrophones

D.4.1 Généralités

Le présent Article D.4 donne un aperçu de l'écart et de la justification de certaines conditions et formules utilisées dans la technique de balayage planaire.

D.4.2 Relation entre les rayons efficaces de l'hydrophone et du transducteur

Soit un transducteur à piston plan de rayon efficace a_t et un **hydrophone** de rayon efficace a_h placé à une distance l du transducteur.

L'onde de bord du transducteur est incidente selon un angle au niveau de l'**hydrophone** donné par

$$\arcsin \left[\frac{a_t}{\left(a_t^2 + l^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (\text{D.12})$$

Dans l'hypothèse où l'**hydrophone** comporte une **réponse directionnelle** donnée par

$$2J_1(ka_h \sin(\theta)) / ka_h \sin(\theta) \quad (\text{D.13})$$

où k est le nombre d'ondes circulaires ($= 2\pi/\lambda$) et θ est l'angle d'incidence, alors il convient que les ondes de bord soient incidentes selon un angle correspondant à moins de 1 dB sous la crête de la **réponse directionnelle**. Dans le cas de la **réponse directionnelle**, cette situation exige que $ka_h \sin(\theta) \leq 1$ (c'est-à-dire que si $ka_h \sin(\theta) = 1$, alors $[2J_1(ka_h \sin(\theta)) / ka_h \sin(\theta)] \cong 0,88$). Par conséquent, cela est équivalent à

$$ka_h \sin(\theta) \leq 1 \quad (D.14)$$

ou

$$\frac{k a_h a_t}{(a_t^2 + l^2)^{\frac{1}{2}}} \leq 1 \quad (D.15)$$

D.4.3 Justification pour $a_t / l \leq 0,5$

Il peut être démontré [25] que l'intensité vraie à une distance axiale l d'une source à piston plan varie d'environ 6 % pour $a_t / l = 0,5$ par rapport à l'intensité dérivée déterminée sur l'hypothèse de la relation de la "pression au carré". Aux positions axiales plus proches du transducteur, l'intensité dérivée de "pression au carré" augmente rapidement comparée à l'intensité vraie. En conséquence, la limite de validité de la Formule (10) pour les besoins du présent document est prise comme $a_t / l \leq 0,5$.

D.4.4 Écart de la Formule (D.2)

Soit la répartition des points $U_L(l, r)$ entre R_{1i} et R_{2i} , les distances entre le **centre du faisceau** et les extrêmes du i^{e} **balayage diamétral du faisceau**. Soit s la distance entre le **centre du faisceau** ultrasonore et le point de balayage le plus proche. Si chaque point est considéré comme contribuant à un anneau, l'intégration du **balayage diamétral** est donnée par

$$\sum_{r=R_{1i}}^{R_{2i}} \pi [U_L(l, r)]^2 r \Delta r \quad (D.16)$$

NOTE Les formules de somme données dans le présent Article D.4 ne sont pas conformes à la convention mathématique normale. Ici, les limites données indiquent les valeurs extrêmes de la somme. Entre ces extrêmes, le paramètre r de la Formule (D.16) représente des valeurs discrètes qui correspondent aux descripteurs des points de balayage spécifiques.

Toutefois, le point central $U_L(l, s)$ ne contribue pas à un anneau centré sur l'**axe du faisceau** de la même manière que tous les autres points. Dans ce cas, il convient de prendre séparément en considération les contributions des deux demi-cercles placés par rapport au point central. La contribution totale entre le point $U_L(l, s)$ et la somme diamétrale est

$$\frac{\pi}{2} [U_L(l, s)]^2 \left[\left(\frac{\Delta r}{2} - s \right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{2} + s \right)^2 \right] \quad (D.17)$$

Étant donné que la Formule (D.16) contient déjà un terme pour le point $U_L(l,s)$, il convient de corriger la Formule (D.16), donné par la différence entre la contribution vraie du point central et le terme inclus dans la Formule (D.16), c'est-à-dire

$$\frac{\pi}{2} [U_L(l,s)]^2 \left[\left(\frac{\Delta r}{2} - s \right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{2} + s \right)^2 \right] - \pi [U_L(l,s)]^2 s \Delta r \quad (D.18)$$

simplifié en

$$\pi [U_L(l,s)]^2 \left[\left(\frac{\Delta r}{2} - s \right)^2 \right] \quad (D.19)$$

Il s'agit du dernier terme de la Formule (D.2).

Si le point $U_L(l,s)$ correspond au centre du faisceau, alors $s = 0$ et les accolades (crochets) de la Formule (D.2) sont simplifiées en

$$\sum_{r=R_{1i}}^{R_{2i}} [U_L(l,r)]^2 r \Delta r + [U_L(l,0)]^2 \frac{\Delta r^2}{4} \quad (D.20)$$

NOTE Étant donné que le terme à l'intérieur de la somme pour le point au centre du faisceau est nul [$r = 0$ pour $U_L(l,0)$], celui de droite correspond à la contribution du centre du faisceau.

D.4.5 Effet de la propagation non linéaire, D.3.7

L'écart de la Formule (D.9) qui couvre la propagation non linéaire est indiqué ci-dessous.

Une approximation utile du champ d'amplitude fini d'un élément rayonnant à piston plan à des distances de l'ordre de, et supérieures à, la distance normalisée, $R = l\lambda / (\pi a_t^2)$, consiste à modéliser le profil du faisceau par une fonction gaussienne.

Pour les déformations légères, le rapport de l'amplitude de la composante de fréquence fondamentale de l'onde sur l'axe acoustique par rapport à l'amplitude en l'absence de déformation est donné par [52]:

$$1 - \frac{\sigma^2}{8} \quad (D.21)$$

avec

$$\sigma = \left(\frac{7 p_1 \pi^2 a_t^2}{\lambda^2 \rho c^2} \right) 2 \sin \left(\frac{1}{2R} \right) (1 + R^2)^{\frac{1}{2}} \ln \left[R + (1 + R^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (\text{D.22})$$

où p_1 est l'amplitude de la pression acoustique au niveau de la face du transducteur ultrasonique et est liée à la puissance ultrasonore totale émise par un transducteur, P_o , par

$$P_o = \frac{\pi p_1^2 a_t^2}{4 \rho c} \quad (\text{D.23})$$

L'amplitude de pression pour les positions excentrées et les faibles amplitudes ($\sigma < 0,5$) est obtenue par la multiplication de σ par la fonction de directivité du transducteur [53] et, ainsi, sur l'hypothèse d'un profil gaussien du faisceau, la racine carrée de l'intégrale du carré de la pression acoustique par rapport à celle obtenue en l'absence de déformation est donnée par

$$1 - \frac{\sigma^2}{16} = \left\{ \frac{2 \pi \int \left[1 - \left(\frac{\sigma^2}{4} \right) \exp \left(- \frac{2r^2}{a_t^2 (1 + R^2)} \right) \right] \exp \left(- \frac{2r^2}{a_t^2 (1 + R^2)} \right) r dr}{2 \pi \int \exp \left(- \frac{2r^2}{a_t^2 (1 + R^2)} \right) r dr} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{D.24})$$

et donc l'erreur de pourcentage dans l'étalonnage d'un **hydrophone** est donnée par

$$100 \frac{\sigma^2}{16} = 100 \left(\frac{49 \pi^3 a_t^2 P_o}{\lambda^4 \rho c^3} \right) \sin^2 \left(\frac{1}{2R} \right) (1 + R^2) \left\{ \ln \left[R + (1 + R^2)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}^2 \quad (\text{D.25})$$

Si R est compris entre 0,5 et 3, alors la Formule (D.25) peut être approchée par la Formule (D.9).

Annexe E (informative)

Propriétés de l'eau

E.1 Généralités

Tableau E.1 – Vitesse du son c [54],[55] et impédance acoustique spécifique ρc , en fonction de la température, pour la propagation dans l'eau

Température °C	Vitesse du son c m s ⁻¹	Impédance acoustique spécifique ρc × 10 ⁶ kg m ⁻² s ⁻¹
15	1 465,9	1,464 7
16	1 469,4	1,467 9
17	1 472,8	1,471 0
18	1 476,1	1,474 0
19	1 479,2	1,476 9
20	1 482,4	1,479 6
21	1 485,4	1,482 3
22	1 488,3	1,485 0
23	1 491,2	1,487 5
24	1 494,0	1,490 0
25	1 496,7	1,492 3
26	1 499,4	1,494 6
27	1 501,9	1,496 7
28	1 504,4	1,498 8
29	1 506,8	1,500 8
30	1 509,2	1,502 6
31	1 511,4	1,504 4
32	1 513,6	1,506 2
33	1 515,8	1,507 8
34	1 517,8	1,509 4
35	1 519,9	1,510 8
36	1 521,8	1,512 2
37	1 523,7	1,513 6
38	1 525,5	1,514 8
39	1 527,2	1,516 0
40	1 528,9	1,517 1

E.2 Coefficient d'atténuation pour la propagation dans l'eau

La valeur de α dans la plage des fréquences en mégahertz est proportionnelle à f^2 et il convient de la prendre en considération à partir de l'ajustement polynomial suivant en fonction de la température T (valide dans la plage comprise entre 0 °C et 60 °C) [46]:

$$\alpha / f^2 = \begin{pmatrix} 56,85 - 3,025\{T\} \\ +1,174 \times 10^{-1} \{T\}^2 \\ -2,954 \times 10^{-3} \{T\}^3 \\ +3,970 \times 10^{-5} \{T\}^4 \\ -2,111 \times 10^{-7} \{T\}^5 \end{pmatrix} \times 10^{-15} \text{Hz}^{-2} \text{m}^{-1} \quad (\text{E.1})$$

NOTE $\{T\}$ représente la valeur numérique de la température en °C.

Si le coefficient d'atténuation de l'amplitude en m^{-1} est donné en dB m^{-1} , sa valeur numérique est multipliée par $20 \log_{10}(e) \approx 8,69$.

Les procédures de préparation de l'eau dégazée sont données dans l'IEC TR 62781 [56].

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62127-2:2025

Annexe F (informative)

Étalonnage absolu des hydrophones par interférométrie optique

F.1 Vue d'ensemble

La présente Annexe F décrit l'état actuel des méthodes absolues d'étalonnage des **hydrophones** à ultrasons adaptés à des fréquences également supérieures à 15 MHz. La base de certaines méthodes utilisées dans le passé, et de celles actuellement en cours d'évaluation, est brièvement décrite à l'Article F.2. Ces méthodes reposent sur la propagation non linéaire des ondes planes et sur l'interférométrie optique. La dernière méthode est particulièrement intéressante, car les étalonnages peuvent être directement identifiés par rapport à des étalons primaires de mesure de la longueur. Ainsi, dans une poignée d'instituts nationaux de métrologie (NMI, *National Metrology Institutes*), l'étalon primaire utilisé pour réaliser le pascal acoustique implique l'application de l'interférométrie optique pour mesurer le déplacement acoustique ou la vitesse d'une fine membrane optiquement réfléchissante. La présente Annexe F décrit également ces méthodes d'étalonnage absolu dans le cadre de différentes mises en œuvre. La différence fondamentale entre les mises en œuvre I (F.2.3.1) et II (F.2.3.2) d'une part et la mise en œuvre III (F.2.3.3) d'autre part réside dans la disposition des faisceaux acoustiques et laser. Dans la mise en œuvre III, contrairement aux mises en œuvre I et II, le faisceau optique traverse le faisceau acoustique, alors que dans les mises en œuvre I et II, la réflexion acoustique est incorporée.

NOTE L'étalonnage "absolu" de l'**hydrophone** s'entend ici dans le sens de "sans référence à un autre **hydrophone**". Il est parfois également appelé étalonnage "principal". D'autre part, dans la pratique, les **hydrophones** sont souvent étalonnés suivant une procédure "secondaire" ou "de substitution", ce qui implique une comparaison de sensibilité avec un **hydrophone** de référence étalonné. L'**hydrophone** de référence lui-même a éventuellement été étalonné en termes "absolus" ou par rapport à un autre **hydrophone** de référence, et ainsi de suite. De toute évidence, il existe deux procédures fondamentales différentes: l'une réalise un étalonnage absolu de l'**hydrophone**, et l'autre compare la sensibilité de deux **hydrophones**. La présente Annexe F traite de la première procédure. La seconde procédure est traitée en détail à l'Article 12. Un étalonnage de substitution implique généralement les deux procédures et les utilisateurs peuvent se reporter à la fois à l'Article 12 et à la présente Annexe F. Les **incertitudes** des deux procédures fondamentales contribuent à l'**incertitude** finale de l'étalonnage dans le cas d'un étalonnage par substitution.

F.2 Position actuelle

F.2.1 Méthode reposant sur la propagation "magnétique" ou non linéaire

Dans le passé, des travaux ont été entrepris pour étalonner des **hydrophones** à des fréquences jusqu'à 100 MHz à l'aide de la méthode dite "magnétique" ou du "modèle empirique de propagation non linéaire" [52],[57],[58],[59],[60],[61]. La méthode est décrite dans [52]. Il s'agit d'utiliser un modèle de propagation non linéaire pour les ondes planes et d'exploiter le fait que, pour un transducteur à piston de diamètre relativement important, un portillonnage temporel adapté du signal acoustique peut isoler la composante d'onde plane de l'onde de bord qui rayonne du bord du piston. À des amplitudes de pression élevées, ces ondes planes subissent une déformation d'amplitude finie, ce qui génère un champ acoustique riche en harmoniques. Un modèle théorique de propagation d'onde plane permet de prévoir la déformation de ces ondes sonores, et un étalonnage de l'**hydrophone** peut être obtenu à chaque fréquence d'harmonique en comparant les prévisions à des mesurages réalisés à proximité de la face du transducteur (sans déformation) et à une distance connue le long de l'axe (déformé et enrichi en harmoniques par propagation non linéaire).

Les résultats obtenus par cette méthode ont été prometteurs et confirmés par la réponse théorique de deux **hydrophones** à membrane. Néanmoins, elle comporte quelques inconvénients. En premier lieu, elle dépend profondément du modèle de propagation utilisé. En second lieu, elle dépend des performances du transducteur utilisé pour générer le champ acoustique. En raison des défauts du transducteur, le champ généré peut dévier de manière significative des ondes planes souhaitées, ce qui produit d'importantes **incertitudes** d'étalonnage.

Les méthodes qui emploient un transducteur à focalisation de diamètre plus réduit pour générer des harmoniques dans un plan focal pallient certains de ces inconvénients. Les champs mesurés sont plus aisément reproductibles à une distance de longueur focale connue qui présente un lobe de faisceau principal bien défini. Le gain focal du transducteur peut fournir des pressions plus élevées remplies d'harmoniques à une distance plus courte que les distances utilisées pour l'approche par onde plane. Des transducteurs à focalisation adaptés avec des propriétés uniformes sont disponibles dans le commerce.

F.2.2 Interférométrie optique

Dans la méthode d'étalonnage fondée sur l'interférométrie optique, le champ acoustique généré par un transducteur est détecté à l'aide d'une fine membrane en plastique (appelée pellicule ou feuille) métallisée sur un côté pour permettre la réflexion optique. La pellicule est suffisamment fine pour être transparente du point de vue acoustique. Elle suit le mouvement de l'onde acoustique, avec mesure de son déplacement par interférométrie optique, et déduction de la pression acoustique du déplacement mesuré. L'**hydrophone** à étalonner remplace la pellicule, le **centre acoustique** de l'**hydrophone** étant placé au même endroit dans le champ acoustique soumis au faisceau laser. L'**hydrophone** est ensuite étalonné en mesurant la tension de sortie qui correspond à la pression acoustique connue.

En clair, une méthode d'étalonnage valable implique impérativement une pression acoustique suffisante pour permettre au signal de l'**hydrophone** de présenter un rapport signal sur bruit acceptable à la fréquence étudiée, c'est-à-dire jusqu'à 40 MHz. Toutefois, l'interféromètre optique détecte réellement le déplacement acoustique, ce qui impose une exigence plus stricte pour un rapport signal sur bruit acceptable. Dans le cas d'une onde plane, l'amplitude de la pression acoustique, p_0 , est donnée par

$$p_0 = \rho c \omega \zeta \quad (\text{F.1})$$

où

- ρ est la (masse) densité du liquide de mesure (eau);
- c est la vitesse du son dans le milieu;
- ω est la fréquence circulaire;
- ζ est l'amplitude du déplacement acoustique, la différence de phase entre la pression et le déplacement étant ignorée.

Ignorer la différence de phase entre la pression et le déplacement signifie que, pour une pression acoustique donnée, l'amplitude du déplacement est réciproquement liée à la fréquence, de sorte que des pressions acoustiques élevées sont exigées pour générer un déplacement mesurable à des fréquences de 40 MHz et supérieures. Noter que les trois mises en œuvre décrites aux F.2.3.1, F.2.3.2 et F.2.3.3 utilisent des transducteurs à focalisation afin de répercuter l'augmentation de la pression acoustique.

F.2.3 Mises en œuvre à haute fréquence de l'interférométrie optique

F.2.3.1 Mise en œuvre I

F.2.3.1.1 Système de mesure

La technique d'étalonnage optique repose sur le mesurage du déplacement d'une membrane placée à la surface d'un liquide qui contient un transducteur (Figure F.1). L'onde sonore générée est normalement incidente et déplace la membrane, ce qui est mesuré à l'aide d'un interféromètre de Michelson [62],[63],[64],[65],[66],[67]. Cet appareil contient un laser qui sert de source lumineuse et un séparateur de faisceau polarisant qui permet de diviser et de combiner le champ optique (Figure F.1). Dans le bras de mesure, la lumière est concentrée sur la feuille, laquelle est revêtue d'une couche d'aluminium pour améliorer la réflexion optique. La concentration assure un faible diamètre de point pour une résolution spatiale suffisante.

Un système de photodétection équilibré à largeur de bande d'environ 100 MHz détecte le champ optique de sortie. Il est composé de deux photodiodes et d'un amplificateur de transimpédance différentiel, A_V , qui supprime le bruit d'amplitude et augmente le courant photoélectrique. L'amplificateur de transimpédance est associé à un second amplificateur V à impédance d'entrée élevée qui peut être utilisé comme un amplificateur d'**hydrophone** (voir ci-après). Dans la réalisation étudiée ici, l'interféromètre est stabilisé [64] par une boucle d'asservissement avec une fréquence de gain unitaire d'environ 100 Hz. Dans ce cas, le déplacement est obtenu à partir des courants photoélectriques mesurés par

$$\zeta = \frac{U_S \lambda_l}{2\pi T \bar{U}} \frac{V(f=0)}{V(f)} \quad (\text{F.2})$$

où

λ_l est la **longueur d'onde** optique (la **longueur d'onde** de la lumière dans le vide);

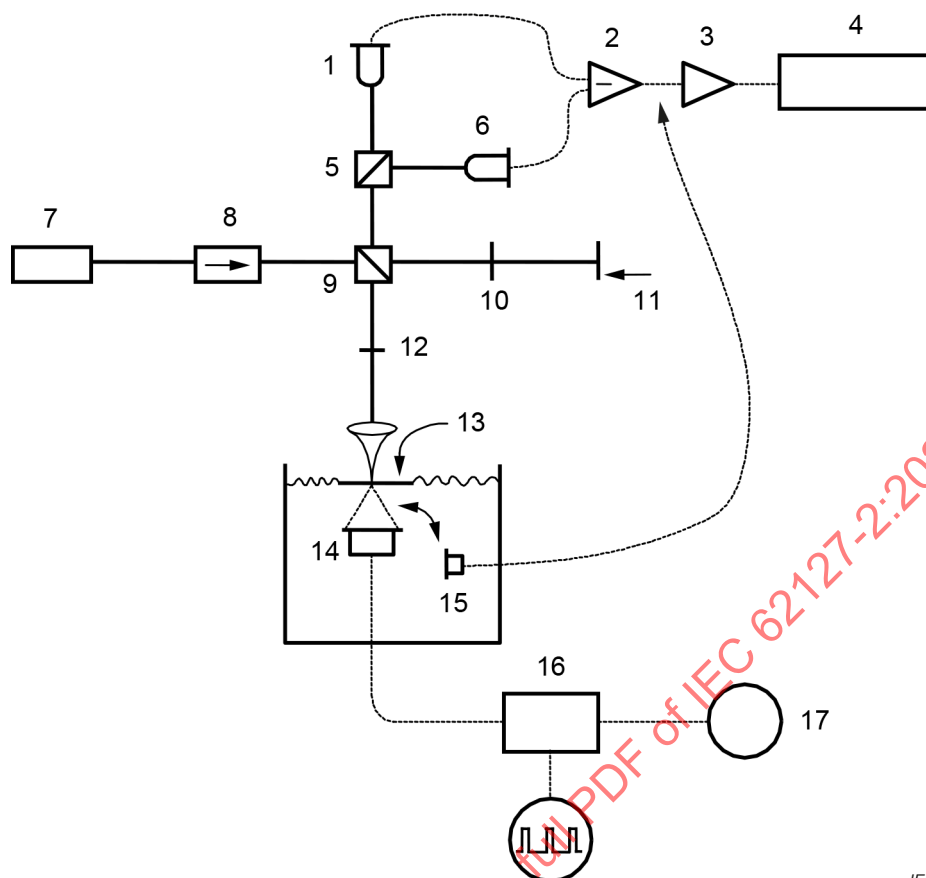
T est le facteur de transmission acoustique du déplacement à travers la feuille;

U_S est la tension du signal;

$\bar{U}$ est la tension crête à crête d'une frange complète de l'interféromètre mesurée à la sortie de l'amplificateur V , qui comporte le gain dépendant de la fréquence $V(f)$.

La tension de sortie, U_S , est détectée par un oscilloscope numérique, c'est-à-dire dans le domaine temporel à largeur de bande importante supérieure à 100 MHz. Pour obtenir un rapport signal sur bruit suffisamment élevé, un transducteur à large bande piézoélectrique à focalisation est utilisé. Il est fourni avec un ensemble de fréquences données, et les données de mesure sont acquises immédiatement après les premiers signes d'ultrasons lorsque l'état stable est atteint. Cette configuration évite les perturbations par réflexion sur les parois du réservoir.

L'alignement est effectué à l'aide d'une translation sur trois axes et d'une rotation autour de deux axes. La tache laser est ajustée au niveau du foyer perpendiculaire à l'**axe du faisceau**, qui est déterminé par des mesurages de pression à deux dimensions à différentes distances du transducteur. La valeur maximale de la sortie de l'interféromètre, le signal acoustique réfléchi et le délai entre l'impulsion d'excitation et le signal de sortie sont des critères suffisants d'alignement par translation. L'angle entre la feuille et la direction de propagation du son est ajusté en prenant comme référence le faisceau laser aligné.



IEC

Légende

1: PD	photodiode
2: A_V	amplificateur de transimpédance
3: V	amplificateur d'hydrophone
4: D-scope	oscilloscope numérique
5: BS	séparateur de faisceau
6: PD	photodiode
7:	laser
8: ISO	isolateur optique
9: PBS	séparateur de faisceau polarisant
10: $\lambda/4$	plaque quart lambda
11: PZT-M	miroir piézoélectrique
12: $\lambda/4$	plaque quart lambda
13: Fo	feuille
14: Tr	transducteur acoustique
15: H	hydrophone
16:	déclencheur
17: $\tilde{f}$	synthétiseur

Figure F.1 – Montage expérimental de la technique de la feuille interférométrique

Après le stockage des données de référence, la feuille est retirée et l'**hydrophone** concerné est fixé au même emplacement que la tache laser précédente. Une certaine quantité d'eau est ajoutée pour immerger l'**hydrophone**. En variante, le transducteur peut être tourné (voir la Figure F.1) pour des raisons de simplicité. L'**hydrophone** est connecté à l'entrée de l'amplificateur V. Ensuite, le mesurage est répété dans des conditions d'excitation identiques.

Le module de la **sensibilité en bout de câble** M_L est obtenu par

$$M_L = \frac{1}{\omega c \rho V(f=0)} \frac{2 \pi T \vartheta}{\lambda} \frac{U_H}{U_S} \quad (\text{F.3})$$

où

- c est la vitesse du son dans l'eau;
- ρ est la (masse) densité du liquide de mesure (eau);
- U_H est la tension de mesure de l'**hydrophone**;
- $\omega (= 2\pi f)$ est la fréquence circulaire du champ acoustique.

Ici, la sortie de l'**hydrophone** est chargée électriquement par l'impédance d'entrée de l'amplificateur V.

F.2.3.1.2 Correction des données

La détermination du module de la **sensibilité en bout de câble** M_L est influencée par trois effets systématiques, qui exigent la correction des données à l'aide de modèles théoriques, comme suit.

F.2.3.1.3 Diamètre de la tâche

Il ne peut pas être admis par hypothèse que l'**hydrophone** et le faisceau laser concentré sur la feuille sont des détecteurs de tâche, et il convient de tenir compte des effets de la moyenne spatiale. Pour décrire de manière quantitative cet effet [66], le transducteur est considéré comme un piston planaire. La distribution du déplacement est obtenue à partir de la solution de l'intégrale de Rayleigh [67], et toutes les valeurs moyennes mesurées peuvent être associées aux valeurs de pression de crête [66].

F.2.3.1.4 Effets de plusieurs passages dans la feuille

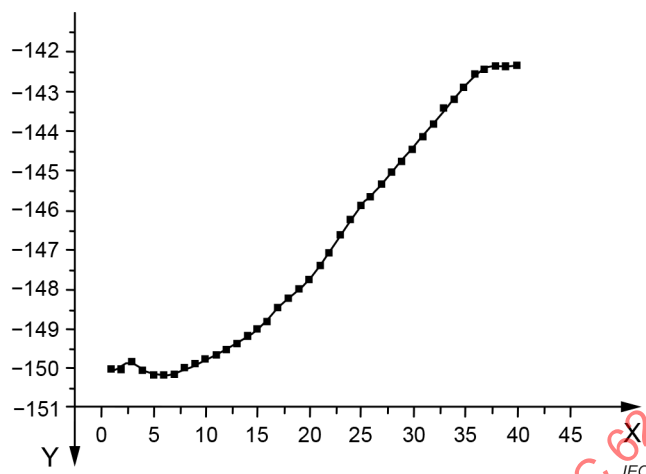
Au niveau du foyer ultrasonore, le fluide est couvert par une feuille revêtue afin d'améliorer la réflexion optique. Le champ acoustique incident est partiellement réfléchi dans la feuille et la couche métallique, et cette interférence de plusieurs faisceaux a une influence sur le déplacement de la feuille. Étant donné que le front de phase au foyer d'un faisceau sonore est pratiquement plat, un simple modèle de résonance [66] qui utilise des ondes planes peut être appliqué pour décrire de manière quantitative l'erreur systématique due à cet effet. Cette configuration donne un facteur de transmission acoustique, T , pour le déplacement, qui est inséré dans la Formule (F.2) et la Formule (F.3).

F.2.3.1.5 Réponse en fréquence du photodétecteur

Contrairement à la dépendance à la fréquence du gain d'amplificateur $V(f)$ qui se produit dans les deux mesurages, la réponse en fréquence du photodétecteur a une influence sur la **sensibilité en bout de câble** M_L . La fonction de transfert a été mesurée à l'aide d'un oscillateur à mélange optique et toutes les données de l'interféromètre ont été corrigées en conséquence.

F.2.3.1.6 Exemple de résultats

À titre d'exemple, la Figure F.2 représente le niveau de **sensibilité en circuit ouvert en bout de câble**, L_{M_c} , d'un **hydrophone** à membrane coplanaire d'une épaisseur de couche de 25 μm .



Légende

X f (MHz)

Y L_{M_c} par rapport à 1 V/Pa en dB

Figure F.2 – Niveau de sensibilité en circuit ouvert en bout de câble, L_{M_c} , d'un hydrophone à membrane coplanaire

L'**incertitude** de ce mesurage dépendait de la fréquence. Entre 1 MHz et 5 MHz, une incertitude de 9,5 % et, dans la plage comprise entre 5 MHz et 20 MHz, une incertitude de 8,0 % ont été évaluées, respectivement. Ces valeurs sont passées à 10 % à 30 MHz et 12 % à 40 MHz. Les valeurs d'**incertitude** données utilisent un facteur d'élargissement de $k = 2$ et ont un niveau de confiance à 95 %.

F.2.3.2 Mise en œuvre II

F.2.3.2.1 Système et procédure de mesure

Généralement, le principe et la configuration de mesure sont similaires à ce qui est décrit pour la mise en œuvre I au F.2.3.1.1. Cependant, au lieu de l'interféromètre de Michelson stabilisé homodyne, un vibromètre hétérodyne à haute fréquence (HF) est utilisé pour mesurer le déplacement de la surface de l'eau (Figure F.3 a). Des précisions sur cette approche peuvent être obtenues dans [68] et seule une brève description est donnée ici. Le système élargit les possibilités d'étalonnage primaire par rapport à la mise en œuvre I. Le système d'interféromètre hétérodyne utilisé est capable de mesurer des déplacements allant jusqu'à plusieurs centaines de nanomètres. Cela permet d'utiliser des impulsions ultrasoniques courtes et à large bande avec des valeurs de pression de crête élevées. Ces impulsions présentent l'avantage de générer des composantes harmoniques supérieures du signal pendant la propagation, en raison des propriétés non linéaires de l'eau à des amplitudes de pression élevées. Deuxièmement, toutes les composantes de fréquence de l'impulsion ont une relation de phase fixe sur le site de mesure, ce qui permet de déterminer la réponse en phase de l'**hydrophone** à partir du mesurage. Le schéma d'excitation permet d'étalonner les **hydrophones** jusqu'à des fréquences élevées en un temps relativement court et de caractériser l'amplitude et la phase en même temps (se reporter à l'Article I.3). Enfin, le photodétecteur intégré à grande vitesse et l'électronique du vibromètre utilisés pour la détection du signal porteur à haute fréquence fournissent une réponse plate dans la plage des fréquences ultrasonores, ce qui réduit les **incertitudes** globales [68],[69].

Un transducteur ultrasonique à focalisation d'une longueur focale nominale de 50 mm est placé à l'intérieur d'un réservoir rempli d'eau désionisée et dégazée. Le transducteur émet une courte impulsion ultrasonique d'une durée inférieure à 1 μ s. L'amplitude de l'impulsion est suffisante pour exciter les effets non linéaires de l'eau, ce qui génère des composantes de signal HF pendant la propagation [70]. L'onde ultrasonique se propage vers le haut, perpendiculairement à la surface de l'eau. L'onde est réfléchiée à la surface de l'eau et la déplace. Le déplacement temporel $\zeta(t)$ est mesuré par le vibromètre, qui est situé au-dessus de la surface de l'eau. Le faisceau laser du vibromètre est perpendiculaire à la surface de l'eau. Cette configuration permet d'éviter les interactions acousto-optiques. Le déplacement modifie le trajet optique de la lumière et contribue à la phase optique du faisceau laser $\varphi(t) = 4\pi\zeta(t)/\lambda_l$ avec la **longueur d'onde** optique λ_l . À l'intérieur du vibromètre, ce faisceau de mesure interfère avec un faisceau de référence décalé en fréquence. Le décalage entre la fréquence angulaire des deux faisceaux est Ω_c , correspondant dans ce cas à une fréquence d'environ 600 Mhz, qui est en même temps la fréquence porteuse du signal du photodétecteur à haute fréquence (HF)

$$U_{pd}(t) = A \sin(\omega_c t + \varphi_0 + \varphi(t)) \quad (F.4)$$

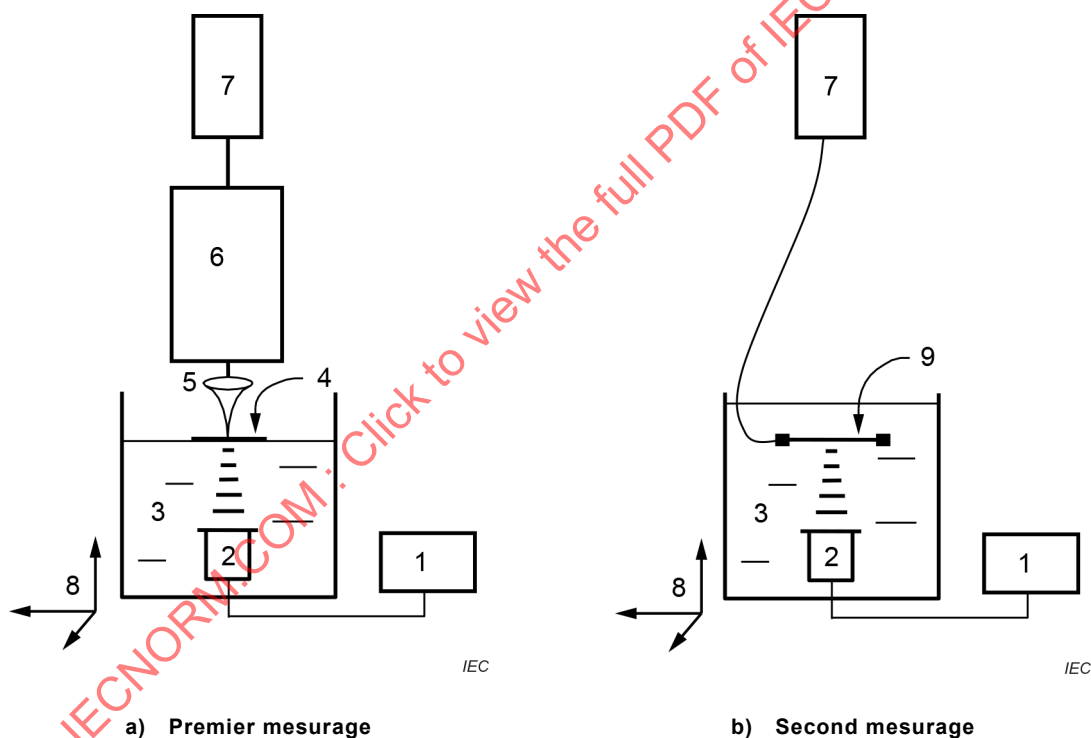
où A désigne l'amplitude du signal porteur et φ_0 la phase initiale. Après numérisation dans l'oscilloscope connecté, le signal est démodulé numériquement à l'aide de la méthode arctan [71]. Cette étape permet d'obtenir la phase optique et donc le déplacement $\zeta(t)$ sous la forme d'un signal basse fréquence (BF) dans la plage des fréquences en mégahertz. Une fine pellicule recouverte d'aluminium est placée à la surface de l'eau. Elle agit comme un miroir pour le faisceau laser et augmente la quantité de lumière réfléchiée. La pellicule suit le mouvement de la surface de l'eau et la transmission du déplacement à travers la pellicule est prise en compte par un facteur de transmission acoustique dépendant de la fréquence, $\underline{T}(f)$ (se reporter au F.2.3.1.4). Pour les basses fréquences, ce facteur a une valeur très proche de 2 et diminue de façon monotone jusqu'à 1,75 à une fréquence de 100 MHz. Le facteur 2 décrit le fait que l'onde ultrasonique est totalement réfléchiée à la surface libre et que le déplacement de la surface est deux fois plus important que le déplacement des particules dans l'eau. La pression acoustique correspondante à l'intérieur de l'eau est calculée à partir du déplacement par la Formule (F.5):

$$\underline{p}(f) = \frac{2\pi i f \underline{\zeta}(f) \rho c}{\underline{T}(f)} \quad (F.5)$$

$\underline{\zeta}(f)$ est le résultat de la transformation de Fourier de $\zeta(t)$ avec la fréquence f . Le facteur $2\pi i f$ avec l'unité imaginaire i , $i^2 = -1$, effectue une dérivation temporelle de ζ exécutée dans le domaine des fréquences. Il transforme le déplacement en vitesse v . Dans l'hypothèse d'une onde plane locale, la vitesse des particules est liée à la pression acoustique $p = v\rho c$ avec la densité de l'eau ρ et la vitesse du son c . Cette hypothèse est valable sur l'axe de symétrie du champ acoustique au point focal d'un transducteur à focalisation et dans le **champ lointain** d'un transducteur ultrasonique à ondes planes. La recherche de l'amplitude maximale du signal permet de déterminer la position latérale maximale.

Dans le second sous-mesurage (Figure F.3 b), l'élément sensible de l'**hydrophone** est situé au même emplacement du champ acoustique auquel la pression a été étudiée lors du mesurage précédent à l'aide du vibromètre. Le niveau d'eau dans le réservoir est augmenté pour immerger entièrement l'**hydrophone**. Tout signal réfléchi à la surface est exclu de la fenêtre temporelle d'acquisition du signal. La tension de l'**hydrophone** $U_H(t)$ qui dépend du temps est enregistrée à l'aide d'un oscilloscope. Ensuite, la tension fait l'objet d'une transformation de Fourier en $\bar{U}_H(f)$. Lors de l'évaluation, la charge électrique à la sortie de l'**hydrophone** ainsi que le gain des amplificateurs externes sont pris en compte. La distance est déterminée par observation du temps de propagation de l'onde ultrasonique. La recherche de l'amplitude maximale du signal permet de déterminer la position latérale maximale, de la même manière que lors du mesurage au vibromètre.

L'utilisation de différentes conditions de charge électrique entre le générateur d'impulsions et le transducteur et de différents réglages de tension du générateur d'impulsions permet de modifier légèrement la forme d'onde de l'impulsion et les fréquences fondamentales et harmoniques des spectres (voir le I.3.1 [72]). En général, cinq formes d'onde d'impulsion différentes sont utilisées pour couvrir toute la plage de fréquences de l'étalonnage avec une puissance de signal élevée, et les sensibilités obtenues avec chaque paire de mesures sont ensuite moyennées.



Légende

- 1: générateur d'impulsions
- 2: transducteur à focalisation
- 3: eau
- 4: pellicule
- 5: objectif
- 6: vibromètre à laser
- 7: oscilloscope numérique
- 8: système de positionnement xyz pour réservoir avec transducteur
- 9: **hydrophone**

Figure F.3 – Montage expérimental de la technique du vibromètre hétérodyne

F.2.3.2.2 Détermination de la sensibilité de l'hydrophone

La sensibilité de l'**hydrophone** en tant que grandeur à valeurs complexes dans le domaine des fréquences est calculée à partir de la pression acoustique à valeurs complexes et des spectres de tension de l'**hydrophone** à valeurs complexes. Le modèle de formule pour calculer la sensibilité de l'**hydrophone** dépendant de la fréquence $\underline{M}(f)$ est le suivant:

$$\underline{M}(f) = \frac{\underline{U}_H(f) \underline{F}_{sp}(f)}{\underline{G}_{scope}(f)} \cdot \frac{\underline{T}(f) \underline{G}_{vib}(f) G_{opt}}{2\pi i f \underline{Z}_L(f) \rho c} \cdot V_{rep} V_z \cdot \frac{\underline{Z}_H(f) + \underline{Z}_L(f)}{\underline{Z}_L(f)} \quad (F.6)$$

y compris les corrections à valeurs complexes suivantes:

$\underline{G}_{scope}(f)$	est la réponse en amplitude de l'oscilloscope qui influence le mesurage de la tension de l' hydrophone ;
$\underline{F}_{sp}(f)$	est le facteur de correction de la moyenne spatiale dû à la taille finie de l' hydrophone ; l' incertitude correspondante comprend la contribution due au défaut d'alignement latéral de l' hydrophone et du vibromètre [68],[70];
$\underline{T}(f)$	est le facteur de transmission acoustique de la pellicule; il est exigé pour corriger le déplacement de la pellicule [66];
$\underline{G}_{vib}(f)$	est la réponse en fréquence du vibromètre après démodulation; ses origines sont les réponses en fréquence de la photodiode, de la ligne de transmission et de l'extrémité avant de l'oscilloscope [68],[71],[73];
G_{opt}	est l'influence de l'objectif du microscope; la focalisation de la lumière a pour effet que l'amplitude du déplacement mesuré est inférieure à l'amplitude réelle [71],[74];
V_{rep}	est la répétabilité du champ acoustique entre le mesurage du vibromètre et le mesurage de l' hydrophone , principalement influencée par la tension appliquée au transducteur; la valeur attendue est égale à 1 en prenant pour hypothèse que le champ acoustique n'est pas modifié pendant le mesurage;
V_z	est la variation du champ acoustique provoquée par la modification de la distance; la valeur attendue est égale à 1, car la distance visée est la même;
$\underline{Z}_L(f), \underline{Z}_H(f)$	sont l' impédance de charge électrique à valeurs complexes de l' hydrophone et l'impédance de source de l' hydrophone , respectivement.

F.2.3.2.3 Détermination de l'incertitude

L'évaluation de l'**incertitude** est réalisée conformément au Guide 98-3:2008 de l'ISO/IEC/Suppl.2:2011 [75] pour traiter les grandeurs complexes. Les dérivées partielles du modèle de formule, Formule (F.6), sont évaluées pour toutes les n grandeurs de sortie $\underline{U}(f)$, $\underline{F}_{sp}(f)$. Les résultats sous forme de nombres complexes forment la matrice de covariance et représentent les **incertitudes**. Tous les calculs sont effectués avec des nombres complexes qui comprennent une partie réelle et une partie imaginaire et, dans l'étape finale, la représentation gaussienne est transformée en représentation polaire avec module et phase. La procédure appliquée est décrite en détail dans le Guide 98-3:2008 de l'ISO/IEC/Suppl.2:2011, Article C.3 [75].

F.2.3.2.4 Champ d'impulsions acoustiques

La zone sensible d'un **hydrophone** a un diamètre de plusieurs dizaines de millimètres. La pression ultrasonique, en particulier dans le cas des hautes fréquences, n'est pas uniformément répartie dans cette zone. La tension de l'**hydrophone** est proportionnelle à la pression acoustique moyenne dans la zone. En revanche, le faisceau laser focalisé du vibromètre a un diamètre inférieur à 12 µm (largeur totale à 1/e²). La tache laser est donc considérée comme un capteur ponctuel qui mesure la pression acoustique de crête au centre du champ acoustique. Le facteur de correction de la moyenne décrit le rapport entre le signal réel mesuré par l'**hydrophone** de taille finie et le signal fourni si la pression acoustique de crête mesurée par le vibromètre est uniformément répartie sur l'ensemble de la zone sensible de l'**hydrophone**. Pour calculer la correction, la distribution spatiale du champ acoustique est mesurée par le vibromètre [68]. Pour ce faire, des balayages radiaux à partir de la position de la pression maximale de crête à crête sont effectués. Après transformation de Fourier, les résultats sont exprimés sous forme de profils radiaux à valeurs complexes dépendant de la fréquence (Figure F.4). Les profils obtenus sont lissés par ajustement des données à des fonctions complexes $\underline{X}(r) = A(r)e^{iB(r)}$ à chaque fréquence, où $A(r)$ et $B(r)$ sont des fonctions polynomiales du sixième ordre. Le calcul de la moyenne spatiale est ensuite effectué par intégration numérique des profils des fonctions polynomiales. La Figure F.5 représente la correction de la moyenne spatiale en fonction de la fréquence pour des exemples d'**hydrophones** dont les **tailles efficaces** sont comprises entre 50 µm et 250 µm (diamètre efficace de l'**hydrophone** compris entre 100 µm et 500 µm).

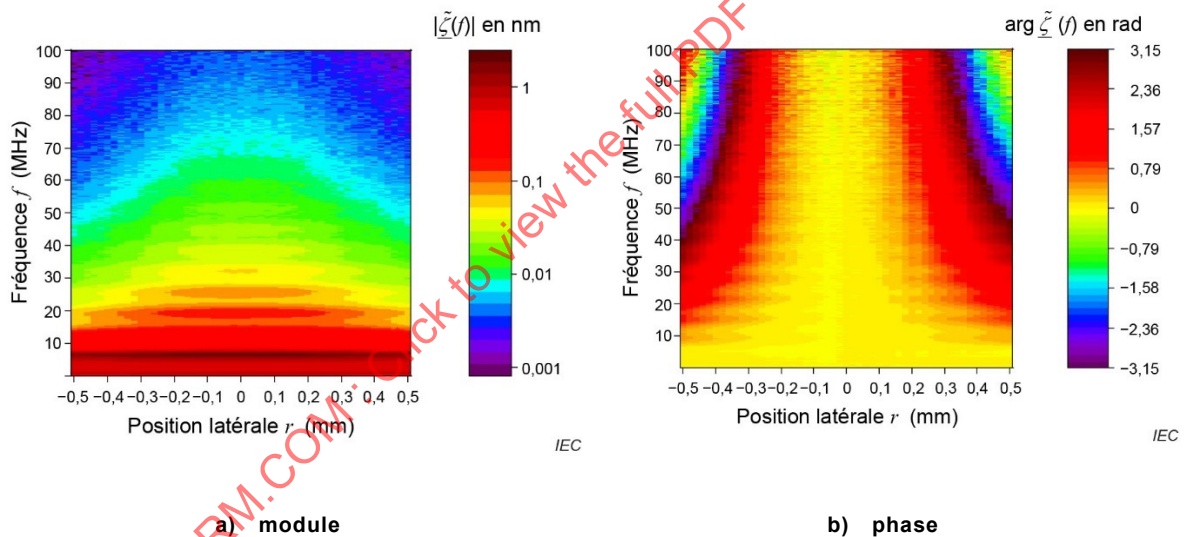


Figure F.4 – Profils radiaux mesurés dépendant de la fréquence du champ d'impulsions acoustiques