IEC 62127-2

Edition 2.0 2025-01

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

colour inside

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.

® Registered trademark of the International Electrotechnical Commission
Marque déposée de la Commission Electrotechnique Internationale

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_{M_c} 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 µm 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 µm 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 $\theta_{\mathrm{m}}(°)$ 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 $G_{\mathrm{c}}(ka_{\mathrm{h}}, \theta_{\mathrm{m}})$ for the spatial average effect of the free-field acoustic pressure over the hydrophone surface if it were removed 105

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*

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 "magnomique" 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 autoréciprocité 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_{M_c}, 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 $\theta_m(°)$ 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*