

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61101

Première édition
First edition
1991-11

**L'étalonnage absolu des hydrophones
par la technique du balayage planaire
dans la gamme de fréquences
de 0,5 MHz à 15 MHz**

**The absolute calibration of hydrophones
using the planar scanning technique
in the frequency range 0,5 MHz to 15 MHz**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61101: 1991

Numéros des publications

Depuis le 1^{er} janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- «Site web» de la CEI*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement
(Catalogue en ligne)*
- **Bulletin de la CEI**
Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates
(On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

* See web site address on title page.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61101

Première édition
First edition
1991-11

**L'étalonnage absolu des hydrophones
par la technique du balayage planaire
dans la gamme de fréquences
de 0,5 MHz à 15 MHz**

**The absolute calibration of hydrophones
using the planar scanning technique
in the frequency range 0,5 MHz to 15 MHz**

© IEC 1991 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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'éditeur.

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 the publisher.

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

T

*Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue*

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	6
Articles	
1 Domaine d'application	8
2 Références normatives	8
3 Définitions	8
4 Liste des symboles	12
5 Détermination de la sensibilité de l'hydrophone	14
6 Procédure de mesurage	20
6.1 Mesurage de puissance	20
6.2 Fixation du transducteur	20
6.3 Conditions de mesurage	20
6.4 Mesurages	22
7 Corrections et sources d'incertitude	22
7.1 Puissance totale	22
7.2 Signal de l'hydrophone	24
7.3 Intégration	24
7.4 Réponse directionnelle	26
7.5 Dimensions finies de l'hydrophone	26
7.6 Bruit	26
7.7 Propagation non linéaire	28
7.8 Balayage planaire	30
7.9 Proportionnalité de l'intensité au carré de la pression	30
ANNEXES	
A (informative)	34
B (informative)	38
C (informative)	42
Bibliographie	46

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
INTRODUCTION	7
Clause	
1 Scope	9
2 Normative references	9
3 Definitions	9
4 List of symbols	13
5 Determination of hydrophone sensitivity	15
6 Measurement procedure	21
6.1 Power measurement	21
6.2 Transducer mounting	21
6.3 Measurement conditions	21
6.4 Measurements	23
7 Corrections and sources of uncertainty	23
7.1 Total power	23
7.2 Received hydrophone signal	25
7.3 Integration	25
7.4 Directional response	27
7.5 Finite size of the hydrophone	27
7.6 Noise	27
7.7 Nonlinear propagation	29
7.8 Planar scanning	31
7.9 Intensity proportional to pressure squared	31
ANNEXES	
A (informative)	35
B (informative)	39
C (informative)	43
Bibliography	46

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

L'ÉTALONNAGE ABSOLU DES HYDROPHONES PAR LA TECHNIQUE DU BALAYAGE PLANAIRE DANS LA GAMME DE FRÉQUENCES DE 0,5 MHz À 15 MHz

AVANT-PROPOS

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

Cette Norme internationale a été établie par le Comité d'Etudes n° 87 de la CEI: Ultrasons.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapport de vote
87(BC)4	87(BC)7

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

Toutes les annexes sont données à titre informatif.

NOTE - Les caractères d'imprimerie suivants sont employés:

- Prescriptions: caractères romains
- *Modalités d'essai: caractères italiques*
- Notes: petits caractères romains
- Les termes figurant en caractères gras dans le texte sont définis à l'article 3.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**THE ABSOLUTE CALIBRATION OF HYDROPHONES
USING THE PLANAR SCANNING TECHNIQUE
IN THE FREQUENCY RANGE 0,5 MHz TO 15 MHz**

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

This International Standard has been prepared by IEC Technical Committee No. 87: Ultra-sonics.

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

Six Months' Rule	Report on Voting
87(CO)4	87(CO)7

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

All annexes are informative.

NOTE - The following print types are used:

- Requirements: in roman type
- *Test specifications: in italic type*
- Notes: in small roman type
- Words in bold in the text are defined in clause 3.

INTRODUCTION

Les répartitions spatiales et temporelles de la pression acoustique dans un champ ultrasonore sont généralement déterminées à l'aide d'hydrophones piézoélectriques miniatures (voir CEI 1102). Ces hydrophones ne sont pas des instruments absolus et doivent donc être étalonnés pour la relation de la tension fournie à la pression dans le champ ultrasonore. On fait appel couramment à deux techniques. L'une d'elles, la réciprocité à deux transducteurs (voir [1]) est décrite dans la CEI 866; l'autre, dénommée en général «balayage planaire» ([2] et [3]), fait l'objet de la présente Norme internationale. Le balayage planaire fait appel à un hydrophone qui décrit le faisceau d'un transducteur dont on connaît la puissance émise. La précision de cette méthode peut être comparable à celle de la réciprocité (voir CEI 866, [4] et [5]).

Le balayage planaire permet l'étalonnage d'un hydrophone à l'aide d'un transducteur de puissance de sortie connue, soit parce qu'il s'agit d'un dispositif standard reproductible, soit parce qu'il a été lui-même étalonné, par exemple grâce à une balance de pression de radiation (voir CEI 1103 et [3]-[7]). Bien que le concept du balayage planaire puisse être appliqué à toute fréquence, les techniques faisant plus particulièrement l'objet de la présente Norme internationale sont surtout utilisables dans la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz.

INTRODUCTION

The spatial and temporal distribution of acoustic pressure within an ultrasonic field is commonly determined by using miniature piezoelectric hydrophones (see IEC 1102). These hydrophones are not absolute devices and the relation between the acoustic pressure in the ultrasonic field and the voltage produced by the hydrophone must be determined by calibration. Two techniques for hydrophone calibration are in common use. One of these, two-transducer reciprocity (see [1]), is described in IEC 866, and the other technique, commonly referred to as planar scanning ([2] and [3]), is described in this International Standard. Planar scanning involves the use of a hydrophone to determine the beam profile of a transducer of known output power. The accuracy of the technique can be comparable with that of reciprocity (see IEC 866, [4] and [5]).

Planar scanning provides a technique for the calibration of a hydrophone by means of a transducer of known output power. The transducer may be a standard device of known and reproducible output power, or it may be calibrated using, for example, a radiation pressure balance (see IEC 1103 and [3]-[7]). Whilst the concept of the technique of planar scanning can be applied at any frequency, the particular techniques described in this International Standard are most applicable to the frequency range 0,5 MHz to 15 MHz.

L'ÉTALONNAGE ABSOLU DES HYDROPHONES PAR LA TECHNIQUE DU BALAYAGE PLANAIRE DANS LA GAMME DE FRÉQUENCES DE 0,5 MHz À 15 MHz

1 Domaine d'application

Cette Norme internationale établit une méthode d'étalonnage pour les hydrophones; cette méthode est basée sur le balayage planaire et vaut pour la gamme de fréquences allant de 0,5 MHz à 15 MHz.

NOTES

1 Les titres des autres publications dont il est fait mention dans cette norme sont inventoriés en page 46.

2 Les unités SI sont utilisées tout au long de cette norme. Il peut être plus commode d'utiliser d'autres unités dans la spécification de certains paramètres tels que les intensités instantanées, lesquelles pourraient être données en W/cm^2 ou mW/cm^2 .

2 Références normatives

Les normes suivantes contiennent des dispositions qui, du fait de la référence qui est faite aux dites normes dans le présent texte, deviennent des dispositions de la présente Norme internationale. Les éditions indiquées étaient en vigueur au moment de la publication du présent texte. Toute norme faisant l'objet de révision, les parties prenantes aux agréments basés sur cette Norme internationale sont invitées à envisager la possibilité d'application des éditions les plus récentes des normes citées ci-dessous. Les membres de l'ISO et de la CEI gèrent des listes à jour des Normes internationales en vigueur.

CEI 50(801): 1984, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 801: Acoustique et électroacoustique*.

CEI 866: 1987, *Caractéristiques et étalonnage des hydrophones fonctionnant dans la gamme des fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz*.

CEI 1102: 1991, *Mesurage et caractérisation des champs acoustiques au moyen d'hydrophones dans la gamme des fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz*.

CEI 1103: xxxx, *Mesurage de puissance acoustique dans les liquides dans la gamme des fréquences de 0,5 MHz à 25 MHz (à l'étude)*.

3 Définitions

Les définitions suivantes s'appliquent pour le besoin de cette Norme internationale. Les définitions de certains paramètres déjà données dans la CEI 1102 et utilisées dans la présente norme y ont été répétées dans les articles 3.4 à 3.6 et 3.8 à 3.9.

3.1 centre du faisceau: Un point dans un plan dans le champ lointain, généralement normal à l'axe d'alignement du faisceau, où l'on trouve la pression acoustique crête spatiale/crête temporelle, dont on trouvera la définition dans la CEI 1102.

THE ABSOLUTE CALIBRATION OF HYDROPHONES USING THE PLANAR SCANNING TECHNIQUE IN THE FREQUENCY RANGE 0,5 MHz TO 15 MHz

1 Scope

This International Standard specifies a method of absolute calibration of hydrophones based on the planar scanning technique in the frequency range 0,5 MHz to 15 MHz.

NOTES

- 1 The titles of other publications referred to in this standard are listed on page 46.
- 2 Throughout this standard SI units are used. In the specification of certain parameters, such as instantaneous intensities, it may be convenient to use other units. For example, instantaneous intensity may be specified in W/cm^2 or mW/cm^2 .

2 Normative references

The following standards contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. At the time of publication, the editions indicated were valid. All standards are subject to revision, and parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the standards indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 50(801): 1984, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV), Chapter 801: Acoustics and electro-acoustics*.

IEC 866: 1987, *Characteristics and calibration of hydrophones for operation in the frequency range 0,5 MHz to 15 MHz*.

IEC 1102: 1991, *Measurement and characterization of ultrasonic fields using hydrophones in the frequency range 0,5 MHz to 15 MHz*.

IEC 1103: xxxx, *Ultrasonic power measurement in liquids in the frequency range 0,5 MHz to 25 MHz (being prepared)*.

3 Definitions

For the purpose of this International Standard, the following definitions apply. Definitions of certain relevant parameters, given in IEC 1102, have been repeated in 3.4 to 3.6 and 3.8 to 3.9.

3.1 **beam centre:** Point in a plane in the far field, usually perpendicular to the beam alignment axis, at which the spatial-peak temporal-peak acoustic pressure occurs. See IEC 1102 for the definition of spatial-peak temporal-peak acoustic pressure.

3.2 balayage diamétral du faisceau: Ensemble de mesurages du niveau de sortie de l'hydrophone effectués sur une ligne droite passant par le centre du faisceau et normale à l'axe d'alignement du faisceau. Le balayage diamétral du faisceau peut avoir une extension différente de chaque côté du centre du faisceau.

3.3 rayon apparent du transducteur acoustique: Rayon d'un disque transducteur acoustique parfait fonctionnant en piston développant une distribution de pression acoustique théorique sensiblement équivalente à la distribution axiale de pression observée pour le transducteur sur une distance axiale limitée.

Symbole: a

Unité: mètre, m

3.4 rayon apparent de l'élément actif de l'hydrophone: Rayon d'un hydrophone récepteur constitué d'un disque rigide ayant une réponse directionnelle théorique de largeur angulaire égale à celle observée pour l'hydrophone réel. La largeur angulaire est déterminée pour un niveau déterminé en dessous de la valeur crête de la réponse directionnelle. Pour des niveaux spécifiés de –3 dB et –6 dB les rayons seront affectés des notations a_3 et a_6 respectivement (voir CEI 1102).

Symboles: a , a_3 , a_6

Unité: mètre, m

3.5 sensibilité en bout de câble de l'hydrophone chargé: Rapport de la tension apparaissant à l'extrémité d'un câble incorporé à l'hydrophone ou sur son connecteur lorsqu'il est relié à une impédance spécifiée à la pression acoustique instantanée dans le champ libre non perturbé d'une onde plane à l'emplacement du centre de l'hydrophone si celui-ci était enlevé (voir CEI 1102).

Symbole: M_L

Unité: volt par pascal, V/Pa

3.6 champ lointain: Champ acoustique situé au-delà de la distance au transducteur à laquelle la pression acoustique instantanée et la vitesse des particules sont sensiblement en phase (voir CEI 1102).

3.7 point de référence de l'hydrophone: Point de l'hydrophone auquel ses caractéristiques électroacoustiques sont rapportées (voir CEI 50(801)).

3.8 pression acoustique instantanée: Valeur de la pression à un instant particulier et à un endroit particulier du champ ultrasonore diminuée de la pression atmosphérique (voir CEI 1102).

Symbole: p

Unité: pascal, Pa

3.9 Intensité instantanée: Énergie transmise dans la direction de propagation de l'onde acoustique par unité de temps et unité de surface normalement à la direction de propagation à un instant et un endroit particuliers du champ acoustique (voir CEI 1102).

Symbole: I

Unité: watt par mètre carré, W/m²

3.10 point de référence du transducteur: Point de référence pour les caractéristiques électroacoustiques du transducteur (voir CEI 50(801)).

3.2 diametrical beam scan: Set of measurements of the hydrophone output voltage made in a straight line passing through the beam centre and normal to the beam alignment axis. The diametrical beam scan may extend to different distances on either side of the beam centre.

3.3 effective radius of an ultrasonic transducer: Radius of a perfect disc piston-like ultrasonic transducer which has a predicted axial acoustic pressure distribution approximately equivalent to the observed axial acoustic pressure distribution over a limited axial distance.

Symbol: a
Unit: metre, m

3.4 effective radius of a hydrophone active element: Radius of a stiff disc receiver hydrophone which has a predicted directional response function with an angular width equal to the observed angular width. The angular width is determined at a specified level below the peak of the directional response function. For the specified levels of 3 dB and 6 dB the radii are denoted by a_3 and a_6 respectively (see IEC 1102).

Symbols: a, a_3, a_6
Unit: metre, m

3.5 end-of-cable loaded sensitivity of a hydrophone: Ratio of the instantaneous voltage at the end of any integral cable or connector of a hydrophone, when connected to a specified electrical input impedance, to the instantaneous acoustic pressure in the undisturbed free field of a plane wave in the position of the acoustic centre of the hydrophone (i.e. if the hydrophone were removed). See IEC 1102.

Symbol: M_L
Unit: volt per pascal, V/Pa.

3.6 far field: Acoustic (sound) field at distances from an ultrasonic transducer where the values of the instantaneous acoustic pressure and particle velocity are substantially in phase. See IEC 1102.

3.7 hydrophone reference point: Point to which electroacoustic characteristics of a hydrophone are referred. See IEC 50(801).

3.8 instantaneous acoustic pressure: Pressure minus the ambient pressure at a particular instant in time and at a particular point in an acoustic field. See IEC 1102.

Symbol: p
Unit: pascal, Pa

3.9 instantaneous intensity: 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. See IEC 1102.

Symbol: I
Unit: watt per metre squared, W/m^2

3.10 transducer reference point: Point to which electroacoustic characteristics of the ultrasonic transducer are referred. See IEC 50(801).

4 Liste des symboles

a	= Rayon apparent de l'élément actif de l'hydrophone.
a_1	= Rayon apparent d'un transducteur.
A_1	= Aire apparente d'un transducteur.
A_g	= Aire géométrique d'un transducteur.
c	= Célérité du son dans un liquide (en général de l'eau).
$D(\Theta)$	= Fonction de réponse directionnelle normalisée.
f	= Fréquence ultrasonore.
$\vec{I}(x,y,z,t)$	= Vecteur d'intensité instantanée en un point (x,y,z) à l'instant t .
$I(x,y,z,t)$	= Module du vecteur d'intensité instantanée en un point (x,y,z) à l'instant t .
I_p	= Module de l'intensité instantanée en supposant sa proportionnalité au carré de la pression.
k	= $(= 2\pi / \lambda)$ Nombre d'onde circulaire.
l	= Distance de l'hydrophone à un transducteur.
M_c	= Sensibilité en bout de câble à circuit ouvert de l'hydrophone.
M_L	= Sensibilité en bout de câble de l'hydrophone chargé.
N	= Nombre d'échantillons sur le diamètre.
$p(x,y,z,t)$	= Pression acoustique instantanée en (x,y,z) à l'instant t .
P_1	= Amplitude de la pression acoustique à la face du transducteur.
$P(l)$	= Puissance acoustique totale traversant un plan infini situé à une distance l dans le champ acoustique d'un transducteur.
P_0	= Puissance acoustique totale émise par un transducteur.
r	= Distance d'un point du balayage au centre du faisceau.
R	= $(= l\lambda / \pi a_1^2)$ Distance normalisée entre un transducteur et l'hydrophone par rapport à la distance de Rayleigh $(\pi a_1^2 / \lambda)$.
R_{1i}, R_{2i}	= Distances du centre du faisceau aux extrémités du i ème balayage diamétral.
s	= Distance du centre du faisceau au point de balayage le plus proche.
$U_L(x,y,z,t)$	= Tension en bout de câble d'un hydrophone situé 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 situé au point de référence (x,y,z) à l'instant t et incorporant le bruit.
$U_n(x,y,z)$	= Niveau de bruit efficace mesuré avec un hydrophone au point de référence (x,y,z) .
U_T	= Tension aux bornes d'un transducteur ultrasonore.
$\vec{v}(x,y,z,t)$	= Vitesse instantanée de déplacement des particules au point (x,y,z) à l'instant t .

4 List of symbols

a	= Effective radius of a hydrophone active element.
a_1	= Effective radius of an ultrasonic transducer.
A_1	= Effective area of an ultrasonic transducer.
A_g	= Geometrical area of an ultrasonic transducer.
c	= Speed of sound in a liquid (usually water).
$D(\theta)$	= Normalized directional response function.
f	= Ultrasonic frequency.
$\vec{I}(x,y,z,t)$	= Instantaneous intensity vector at the point (x,y,z) at time t .
$I(x,y,z,t)$	= Magnitude of the instantaneous intensity at the point (x,y,z) at time t .
I_p	= Magnitude of the instantaneous intensity assuming proportionality with acoustic pressure squared.
k	= $(= 2\pi / \lambda)$ Circular wave number.
l	= Distance between a hydrophone and an ultrasonic transducer.
M_c	= End-of-cable open-circuit sensitivity of a hydrophone.
M_L	= End-of-cable loaded sensitivity of a hydrophone.
N	= Number of diametrical samples.
$p(x,y,z,t)$	= Instantaneous acoustic pressure at the point (x,y,z) at time t .
p_1	= Acoustic pressure amplitude at the face of a transducer.
$P(l)$	= 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.
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_{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.
$U_L(x,y,z,t)$	= 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 noise level measured with the hydrophone at the reference point (x,y,z) .
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 .

- α = Coefficient d'atténuation en amplitude pour un liquide (eau en général) à la fréquence d'étalonnage de l'hydrophone.
- δ = Amplitude du second harmonique exprimée en pourcentage du fondamental pour la pression acoustique.
- Θ = Angle entre la direction de propagation acoustique et l'axe des x. Ceci est équivalent dans le cadre de ce document à l'angle entre la direction de propagation et la ligne joignant le centre du transducteur au centre de l'hydrophone.
- Θ_1 = Angle entre la ligne joignant les centres de l'hydrophone et du transducteur et la direction de sensibilité maximale de l'hydrophone.
- λ = Longueur d'onde acoustique dans le liquide (eau en général).
- ρ = Densité du liquide (eau en général).
- ω = $(= 2\pi f)$ fréquence angulaire.

5 Détermination de la sensibilité de l'hydrophone

M_L étant la sensibilité en bout de câble de l'hydrophone chargé de l'hydrophone dont le point de référence de l'hydrophone est situé au point de coordonnées (x,y,z) , la pression acoustique instantanée $p(x,y,z,t)$ est liée à la tension mesurée en bout de câble $U_L(x,y,z,t)$ par la relation:

$$p(x,y,z,t) = U_L(x,y,z,t) / M_L \quad (1)$$

où (x,y,z) représentent les coordonnées d'un point quelconque du champ acoustique et t un instant quelconque. Ici $p(x,y,z,t)$ est la pression d'une onde plane au point de référence de l'hydrophone lorsque l'hydrophone est enlevé.

Lorsque le diamètre de l'élément actif de l'hydrophone n'est pas petit ($< \lambda / 4$) comparé à la longueur d'onde λ , il faut prendre en considération son rayon apparent a lors du mesurage du champ acoustique d'un transducteur fonctionnant en piston plan de rayon apparent a_1 . Il peut être montré (voir annexe A, [8] et [9]) que l'onde ultrasonore atteindra l'hydrophone dans le voisinage de la région centrale de sa réponse spatiale si $ka_1 a / (l^2 + a_1^2)^{1/2} \leq 1$, l étant la distance entre l'hydrophone et le transducteur.

Le vecteur d'Intensité Instantanée $\vec{I}(x,y,z,t)$ en un point du champ d'un transducteur dont le point de référence du transducteur est à l'origine des coordonnées est donné par:

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

où $\vec{v}(x,y,z,t)$ est le vecteur de vitesse instantanée des particules.

On ne considérera que les composantes selon la direction de propagation de $\vec{I}$ et $\vec{v}$ en l'occurrence les quantités scalaires I et v .

- α = Amplitude attenuation coefficient for a liquid (usually water) at the frequency of hydrophone calibration.
- δ = Amplitude of the second harmonic expressed as a percentage of the acoustic pressure at the fundamental frequency.
- Θ = Angle between the ultrasonic propagation direction and the x-axis. For the purpose of this International Standard, this is 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.
- λ = Acoustic wavelength in a liquid (usually water).
- ρ = Density of liquid (usually water).
- ω = $(= 2\pi f)$ angular frequency.

5 Determination of hydrophone sensitivity

If M_L is the end-of-cable loaded sensitivity of a hydrophone whose hydrophone reference point 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

$$p(x,y,z,t) = U_L(x,y,z,t) / M_L \quad (1)$$

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 plane wave at the hydrophone reference point if the hydrophone were removed.

If the diameter of the active element of the hydrophone is not small ($< \lambda / 4$) compared with the wavelength, λ , its effective radius, a , shall be taken into account when it is used to measure the acoustic field of a plane piston transducer with an effective radius a_1 . It can be shown (see annex A, [8-9]) that the ultrasound will be incident on the hydrophone at an angle within the central region of its directional response function provided $ka_1 a / (l^2 + a_1^2)^{1/2} \leq 1$, where l is the distance between the hydrophone and the transducer.

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

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

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

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 .

Pour une onde progressive l'intensité peut être donnée [10] sous certaines conditions ($a_1 / l \leq 0,5$) par:

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

où ρ est la densité de l'eau et c est la célérité du son dans l'eau.

La puissance totale $P(l)$ transmise à travers un plan situé dans un plan normal à l'axe x , à la distance $x = l$ est donnée par:

$$P(l) = \iint \overline{I(l, y, z, t)} \cos \Theta \, dydz \quad (3)$$

où $dydz$ est un élément d'aire du plan $x = l$, Θ est l'angle entre l'axe x et la direction de propagation. L'intégrale est effectuée sur le plan entier.

NOTE 1 – Aux distances l évoquées dans cette norme (supérieures à $A_1 / \pi \lambda$ où A_1 est l'aire apparente du transducteur, voir l'article 6.3), Θ peut être pris égal à l'angle entre l'axe x et la ligne joignant les centres du transducteur et de l'hydrophone.

La barre horizontale de l'équation (3) dénote le moyennage temporel, défini pour toute quantité g par:

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

En prenant la moyenne temporelle de l'équation (2)

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

et d'après l'équation (1)

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

où $U_L(x, y, z, t)$ est la tension crête fournie par l'hydrophone au point de coordonnées (x, y, z) . On suppose ici que l'on mesure la valeur moyenne dans le temps du carré de la tension instantanée. En utilisant l'équation (3) pour le plan $x = l$ et en négligeant le terme en $\cos \Theta$ (voir 5.8) la sensibilité en bout de câble de l'hydrophone chargé, M_L vaut:

$$M_L = \left\{ \frac{1}{P(l) \rho c} \iint \overline{[U_L(l, y, z, t)]^2} \, dydz \right\}^{1/2} \quad (4)$$

Elle peut donc être déterminée en balayant un plan du champ acoustique et en divisant l'intégrale du carré du signal de l'hydrophone par la puissance totale contenue dans le faisceau.

NOTE 2 – La sensibilité en bout de câble à circuit ouvert M_c peut être déterminée selon la procédure du 5.1.2 de la CEI 1102.

For progressive wave propagation under certain conditions ($a_1 / l \leq 0,5$), the instantaneous intensity can be given [10] by

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

where ρ is the density of water and c the speed of sound in water.

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

$$P(l) = \iint \overline{I(l, y, z, t)} \cos \Theta \, dydz \quad (3)$$

where $dydz$ is an elemental area in the plane $x = l$, Θ is the angle between the x -axis and the propagation direction and the integral denotes integration over the entire plane.

NOTE 1 – At the distances l considered in this standard (greater than $A_1 / \pi \lambda$ where A_1 is the effective area of the transducer, see 6.3), Θ can be considered to be the angle between the x -axis and the line joining the centre of the transducer to the centre of the hydrophone.

The bar in equation (3) indicates the time-averaged value defined for any quantity g by

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

Taking the time-average of equation (2)

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

and from equation (1)

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

where $U_L(x, y, z, t)$ is the instantaneous voltage from the hydrophone at the point (x, y, z) . Here, it is assumed that the time-average value of the square of the instantaneous voltage is measured. From equation (3), on the plane $x = l$ and neglecting the $\cos \Theta$ term (see 5.8), the end-of-cable loaded sensitivity, M_L , is given by

$$M_L = \left\{ \frac{1}{P(l) \rho c} \iint \overline{[U_L(l, y, z, t)]^2} \, dydz \right\}^{1/2} \quad (4)$$

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 end-of-cable open-circuit sensitivity, M_o , may be determined according to the procedure outlined in 5.1.2 of IEC 1102.

On dispose de nombreux moyens pour balayer le plan $x = l$ avec l'hydrophone. Le plus simple est un balayage tramé rectangulaire, dans ce cas,

$$\iint [U_L(l, y, z, t)]^2 dydz \approx \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [U_L(l, y_m, z_n, t)]^2 \Delta y \Delta z \quad (5)$$

où M et N sont les numéros des échantillons dans les directions respectives y et z , Δy et Δz étant les pas dans les directions y et z .

Un autre type de balayage peut être intéressant lorsque le faisceau peut être approximé comme étant symétrique de révolution. Dans ce cas on peut effectuer des balayages diamétraux, lesquels devront passer par le centre du faisceau et être régulièrement espacés angulairement. Si, par exemple, on procède à deux balayages, ils devront être à 90° l'un de l'autre; pour N balayages (voir annexe A):

$$\iint [U_L(l, y, z, t)]^2 dydz \approx (\pi/N) \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{r=R_{1i}}^{R_{2i}} [U_L(l, r)]^2 r \Delta r + [U_L(l, s)]^2 ((\Delta r/2) - s)^2 \right\} \quad (6)$$

où

r est la distance de chaque point du balayage au centre du faisceau (égale à $(y^2 + z^2)^{1/2}$ si le centre du faisceau est confondu avec l'origine du système de coordonnées y, z);

Δr est l'incrément;

R_{1i} et R_{2i} sont les distances du centre du faisceau aux extrémités du i ème balayage diamétral;

s est la distance du point de balayage le plus près du centre du faisceau à celui-ci.

Le second terme à droite est la contribution du centre du faisceau à l'intégrale totale.

NOTE 3 – L'équation (6) ne suppose pas qu'un point du balayage coïncide avec le centre du faisceau ou que les points du balayage sont également espacés de ce centre du faisceau. Une formulation simplifiée de l'équation (6) est donnée en annexe A pour le cas où un point du balayage coïncide avec le centre du faisceau.

There are several ways of scanning the hydrophone over the plane $x = l$ 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

$$\iint \overline{[U_L(l, y, z, t)]^2} dydz \approx \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \overline{[U_L(l, y_m, z_n, t)]^2} \Delta y \Delta z \quad (5)$$

where M and N are the number of sample points in the y and z directions, respectively, and Δy and Δz are the step sizes in the y and z 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 may 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 (see annex A):

$$\iint \overline{[U_L(l, y, z, t)]^2} dydz \approx (\pi/N) \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{r=R_{1i}}^{R_{2i}} [U_L(l, r)]^2 r \Delta r + [U_L(l, s)]^2 ((\Delta r/2) - s)^2 \right\} \quad (6)$$

where

r is the distance of each scan point from the ultrasonic beam centre (equal to $(y^2 + z^2)^{1/2}$ if the beam centre is chosen at the origin of the y, z 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 beam centre to the scan point closest to the beam centre.

The second term on the right-hand side of equation (6) is the contribution to the total integral from the ultrasonic beam centre.

NOTE 3 – Equation (6) does not assume that a scan point coincides with the beam centre or that scan points are equally spaced from the beam centre. A simplified expression for equation (6) is given in annex A for the case of a scan point coinciding with the beam centre.

6 Procédure de mesurage

6.1 Mesurage de puissance

On fera usage d'un transducteur constitué d'un élément actif circulaire plan dont la puissance de sortie totale à une fréquence f est connue.

Le transducteur peut être un transducteur normalisé, auquel cas la puissance de sortie sera une fonction connue de la tension appliquée. Il est aussi possible de commencer à déterminer la puissance de sortie en faisant par exemple usage de la méthode basée sur la pression de radiation telle que décrite dans la CEI 1103. Quelle que soit la solution adoptée, on aura déterminé la puissance de sortie P_o à la fréquence f d'un signal d'excitation sinusoïdal de tension U_T , ou pour une plage de tensions. Le résultat de ces mesurages est une valeur du rapport de la puissance émise au carré de la tension appliquée.

NOTE - Bien qu'il ne soit pas indispensable que le transducteur ait une surface active circulaire plane, d'autres options pourront conduire à des incertitudes supérieures.

6.2 Fixation du transducteur

Le transducteur est monté horizontalement dans la cuve d'examen et ainsi aligné que l'axe du faisceau acoustique soit parallèle à l'axe x du système d'exploration, comme décrit dans la 7.1 de la CEI 1102. L'hydrophone à étalonner est monté dans la cuve et aligné selon la procédure de 8.1 de la CEI 1102. A l'issue de cette procédure, devront être parallèles: l'axe x du système d'exploration, l'axe d'alignement du transducteur et la direction de sensibilité maximale de l'hydrophone.

Il a été admis pour la description de la procédure que le transducteur est monté horizontalement; si l'on choisit d'autres orientations, on veillera à conserver l'alignement de l'hydrophone et du transducteur avec un des axes du système d'exploration, pris comme axe x ci-dessus.

6.3 Conditions de mesurage

Le transducteur est excité par un train d'ondes sinusoïdales contenant un nombre d'alternances suffisant pour atteindre un régime d'équilibre de fréquence f à une tension particulière U_T ou compatible avec la plage mesurable par la technique de pression de radiation. L'hydrophone est situé dans le champ lointain à la distance l du transducteur et l'on repère le point de pression acoustique maximale. La distance l doit être choisie avec grand soin en tenant compte des corrections du moyennage spatial, de directivité et absorption (voir 7.1, 7.4 et 7.5) et de la nécessité d'un rapport signal/bruit maximal. On peut en général considérer comme satisfaisante une valeur comprise entre $A_1/\pi\lambda$ et $3A_1/\pi\lambda$; A_1 étant l'aire apparente du transducteur et λ la longueur d'onde.

NOTE - L'aire géométrique du transducteur peut être utilisée pour remplacer l'aire apparente.

Une excitation continue du transducteur peut être employée si l'usage de trains d'ondes est trop délicat; on apportera alors un soin extrême à éviter les réflexions sur les parois de la cuve ainsi que sur l'hydrophone et son montage et la création d'ondes stationnaires (voir CEI 1102 et [11]).

6 Measurement procedure

6.1 Power measurement

A transducer with a plane disc active element of known total output power at a particular frequency f shall be used.

The transducer may be a standard transducer in which case the output power shall be known in terms of the particular drive voltage. Alternatively, the output power shall first be determined using, for example, the radiation pressure method as described in IEC 1103. Whichever method is used, the total output power, P_o , from the transducer shall be determined 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 give a value for the output power divided by the square of the voltage.

NOTE - Whilst it is not essential that a transducer with a plane circular active element is used, alternative devices may lead to larger uncertainties.

6.2 Transducer mounting

The transducer is mounted horizontally in a beam scanning tank and aligned so that the ultrasonic beam axis is parallel to the x-axis of the scanning system, as described in 7.1 of IEC 1102. The hydrophone to be calibrated is also mounted in the scanning tank and aligned following the procedure described in 8.1 of IEC 1102. At the end of this alignment procedure, the x-axis of the scanning system should be parallel to both the beam alignment axis of the transducer and to the direction of maximum sensitivity of the hydrophone.

It has been assumed that the transducer is mounted horizontally for the purpose of describing the procedure. If alternative orientations are used, the relative alignment of the transducer and hydrophone and one of the axes of the scanning system (referred to above as the x-axis) shall be maintained.

6.3 Measurement conditions

The transducer is driven 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 pressure technique. The hydrophone is positioned at $x = l$ in the far field of the transducer and the point of peak acoustic pressure is located. The distance l has to be chosen carefully, taking account of spatial averaging, directivity and attenuation corrections (see 7.1, 7.4 and 7.5) and the need for maximum signal-to-noise ratio; a value in the range from $A_1/\pi\lambda$ to $3A_1/\pi\lambda$ is generally satisfactory, where A_1 is the effective area of the transducer and λ is the ultrasonic wavelength.

NOTE - Geometrical area of the transducer may be used instead of effective area.

Continuous-wave excitation of the ultrasonic transducer may be used if gating of the excitation is impractical. In this case, extreme care shall be taken to avoid reflections from the tank walls and the hydrophone and its support, and the formation of standing waves. See IEC 1102 and [11].

6.4 Mesurages

On mesure l'amplitude de la tension délivrée par l'hydrophone lors d'un balayage orthogonal ou diamétral du plan normal à l'axe x et situé à la distance $x = l$. La tension de sortie $U_L(l, y, z)$ de l'hydrophone est relevée en fonction de la position de l'hydrophone dans le champ acoustique. Les dimensions de la zone explorée seront déterminées en prenant en compte le rapport signal/bruit (voir 7.6). On effectue ensuite la sommation du carré de la tension sur l'aire du faisceau en utilisant l'une des équations (5) ou (6) et l'on tire de l'équation (4) une valeur pour la sensibilité en bout de câble de l'hydrophone chargé.

7 Corrections et sources d'incertitude

On procédera à une estimation des correctifs et sources d'incertitude décrits ci-après. On établira finalement une valeur de l'incertitude totale pour la **sensibilité en bout de câble de l'hydrophone chargé** en extrayant la racine carrée de la somme des carrés de chaque incertitude. On tiendra compte des incertitudes systématiques et aléatoires, ces dernières étant évaluées pour un niveau de confiance de 99 %. L'annexe C donne une estimation des incertitudes.

7.1 Puissance totale

L'hydrophone est positionné en $x = l$ pour les mesurages de l'article 6. Dans ce cas on fera une correction pour la puissance totale P_0 émise par le transducteur, positionné en $x = 0$, tenant compte de l'atténuation dans l'eau au moyen de l'expression:

$$P(l) = P_0 \exp(-2\alpha l),$$

où

P_0 est la puissance de sortie du transducteur,

$P(l)$ la puissance totale dans le faisceau à la distance l où se situe l'hydrophone,

α est le coefficient d'atténuation en amplitude pour une onde plane.

La valeur de α dans le domaine de fréquences proches du mégahertz est proportionnelle à f^2 sera estimée en fonction de la température T , dans la plage 0 °C à 60 °C, par l'expression polynomiale suivante:

$$\begin{aligned} \alpha/f^2 &= (5,68524 \times 10^{-1} - 3,02545 \times 10^{-2} T \\ &+ 1,17416 \times 10^{-3} T^2 - 2,95430 \times 10^{-5} T^3 \\ &+ 3,96985 \times 10^{-7} T^4 - 2,11091 \times 10^{-9} T^5) \times 10^{-15} \text{ Hz}^{-2} \text{ m}^{-1} \end{aligned}$$

(Voir [2] et [12].)

Il y a trois sources d'incertitude pour $P(l)$ et l'on estimera chacune de ces incertitudes. Il y a en premier lieu une incertitude systématique sur la détermination de la puissance de sortie totale, P_0 , que ce soit pour un transducteur normalisé ou pour un transducteur dont la puissance a été mesurée par une balance de pression de radiation.

La seconde source d'incertitude tient à la différence qui peut exister entre la puissance supposée (pour un transducteur étalon) ou mesurée du transducteur a priori et celle qui est réellement délivrée pendant le balayage par l'hydrophone. L'importance de cette incertitude peut être estimée grâce à une connaissance préalable de la stabilité du transducteur; ceci devra être fait pour chaque transducteur individuel utilisé.

6.4 Measurements

The amplitude of the output voltage of the hydrophone is measured as the hydrophone is scanned over the plane $x = l$ perpendicular to the x -axis either in a raster scan or in a number of diametrical beam scans. The output voltage $U_L(l, y, z)$ at the hydrophone is measured as a function of the position of the hydrophone in the ultrasonic beam. The extent of the scanned region shall be determined from considerations of the noise level (see 7.6). The square of the voltage is then summed over the area of the ultrasonic beam using either equation (5) or equation (6), and a value for the end-of-cable loaded sensitivity of the hydrophone at the frequency f is derived using equation (4).

7 Corrections and sources of uncertainty

Estimates shall be made for each of the following corrections and sources of uncertainty. A final statement of the total uncertainty in the determination of the end-of-cable loaded sensitivity of the hydrophone shall be made from the square root of the sum of the squares of the individual sources of uncertainty. Both systematic and random uncertainties shall be included, the latter shall be assessed at a 99 % confidence level. An estimate of uncertainties is given in annex C.

7.1 Total power

For the measurements referred to in clause 6, the hydrophone is positioned at a distance $x = l$ from the transducer, in which case a correction to the total output power, P_o , from the transducer (assumed to be at $x = 0$) shall be made for the attenuation of the water path using the expression

$$P(l) = P_o \exp(-2\alpha l),$$

where

P_o is the total output power of the transducer;

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

α is the amplitude attenuation coefficient of plane waves in water.

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

$$\begin{aligned} \alpha/f^2 = & (5,68524 \times 10^1 - 3,02545 \times 10^0 T \\ & + 1,17416 \times 10^{-1} T^2 - 2,95430 \times 10^{-3} T^3 \\ & + 3,96985 \times 10^{-5} T^4 - 2,11091 \times 10^{-7} T^5) \times 10^{-15} \text{ Hz}^{-2} \text{ m}^{-1} \end{aligned}$$

(See [2] and [12])

There are three sources of uncertainty in the value for the total power $P(l)$ and an estimate shall be made of each one. Firstly 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 pressure technique.

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 shall be determined separately for each transducer that is used.

La dernière source d'incertitude quant à la détermination de la puissance vient de la correction de l'atténuation de l'eau du fait du coefficient α/f^2 , l'incertitude étant de $\pm 1,7\%$ à toute température (voir [2] et [12]), ainsi que de la distance l entre le transducteur et l'hydrophone qui peut être déterminée à l'oscilloscope par le temps de propagation.

7.2 Signal de l'hydrophone

On mesure en général l'amplitude du signal $U_L(l, y, z, t)$ délivré par l'hydrophone au moyen d'un oscilloscope, convertisseur analogique/numérique ou autre système approprié dont on devra déterminer l'incertitude. Cette incertitude dépendra du contenu harmonique du signal généré par l'hydrophone et la réponse en fréquence de ce dernier ainsi que de la méthode utilisée.

Il a été montré que la technique du balayage planaire utilisée avec des formes d'ondes distordues conduit à des erreurs d'étalonnage significatives [13]. Les erreurs sont plus importantes si la pression acoustique crête positive est utilisée pour la mesure du signal de l'hydrophone et diminuent si l'on utilise la pression crête à creux ou la pression crête négative.

7.3 Intégration

Il est essentiel dans la technique du balayage planaire de prélever un nombre suffisant de mesures dans le faisceau. Dans le cas du balayage diamétral, et dans l'hypothèse d'une symétrie de révolution, une analyse semblable à celle de la référence [2] permet de montrer que, dans la mesure où il y a au moins sept points de mesure entre (inclusive-ment) les deux points à -6 dB du maximum de pression acoustique, (ou cinq points entre les points à -6 dB sur un profil du carré de la pression), l'incertitude sur la sensibilité résultant de l'intégration est inférieure à 1% . Si l'on utilise un balayage tramé orthogonal, on peut montrer que si M et N de l'équation (5) sont choisis de sorte que les balayages passant par le centre du faisceau selon les axes y et z contiennent au moins et inclusive-ment sept points de mesure entre les points à -6 dB du maximum de pression, l'incertitude est inférieure à 1% . On fera une estimation de l'incertitude due à un nombre fini de points de mesure.

Dans le cas de balayages diamétraux, on peut contrôler la validité de l'hypothèse de symétrie de révolution en analysant séparément les résultats de chaque élément radial de balayage selon

$$\sum_{j=0}^{r_1} [U_L(l, r_j)]^2 r_j \Delta r$$

où r_1 est la distance du centre du faisceau aux extrémités de chaque balayage radial.

On déterminera le taux d'écart entre le minimum et le maximum de ces valeurs et la demi-valeur sera l'incertitude introduite par l'hypothèse de symétrie de révolution dans le cas de balayages radiaux.

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 shall be taken as $\pm 1,7\%$ at all temperatures (see [2] and [12]), and also in the determination of the separation l between the transducer and the hydrophone. This separation may 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.

7.2 Received hydrophone signal

The magnitude of the hydrophone signal $U_L(l,y,z,t)$ is generally determined using an oscilloscope, digitizer or any other appropriate system, and the uncertainty in the measurement of this signal shall 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 [13]. These errors are largest if the peak-positive acoustic pressure is used for measuring the hydrophone signal and decrease if either the peak-to-peak or the peak-negative acoustic pressure is used.

7.3 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 reference [2] that, provided 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 $\pm 1\%$. If a raster scanning technique is used, then it can be shown that if both M and N in equation (5) are chosen such that both the beam scans passing through the beam centre in the y and z 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 $\pm 1\%$. 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 may be tested by analyzing the data from each radial part of the scan separately in the form

$$\sum_{j=0}^{r_1} [U_L(l,r_j)]^2 r_j \Delta r$$

where r_1 is the distance from the beam centre to the extreme of each radial scan.

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.

7.4 Réponse directionnelle

A moins que la réponse spatiale de l'hydrophone ne soit pas prévisible on calculera une correction pour ce paramètre; sinon on modifiera l'incidence de l'hydrophone en chaque point de mesurage de manière à obtenir le maximum de signal. Il peut ne pas être nécessaire d'optimiser la rotation pour chaque point de mesurage, en particulier si la distance entre les points n'induit qu'une faible différence d'incidence du faisceau acoustique sur l'hydrophone. Voici la procédure de calcul: on détermine en premier lieu la réponse directionnelle de l'hydrophone à la fréquence f au moyen de la procédure de 5.1.3 de la CEI 1102, soit la fonction de réponse directionnelle normalisée $D(\Theta_1)$ dans laquelle Θ_1 représente l'orientation; on devra alors corriger dans les mesurages la réponse de l'hydrophone $U_L(l,y,z)$ par le facteur $D(\Theta_1)$, où $\Theta_1 = \tan^{-1}[(y^2 + z^2)^{1/2}/l]$.

7.5 Dimensions finies de l'hydrophone

L'hydrophone est sensible à l'intégrale de la pression acoustique sur sa surface active, en conséquence de quoi une correction du moyennage spatial peut être nécessaire. On évaluera l'importance de cette correction en calculant la différence entre la pression en un point du champ acoustique et la moyenne de la pression sur la surface de l'hydrophone (voir CEI 866 et [9]). On utilisera, pour les besoins de ce calcul, la surface apparente de l'hydrophone comme surface sur laquelle est effectué le moyennage. La surface apparente sera déterminée à partir du rayon apparent de l'élément actif de l'hydrophone, lui-même établi selon la procédure de 5.1.4 de la CEI 1102. Les contributions à l'intégrale de l'équation (4) dans la procédure du balayage planaire les plus importantes viennent du centre du faisceau. En conséquence il n'est nécessaire de déterminer l'incertitude et d'appliquer un facteur correctif que pour les régions proches du centre du faisceau acoustique. Il est en général préférable de procéder au mesurage à une distance l du transducteur telle que l'effet du moyennage spatial au centre du faisceau soit inférieur à 5 %. On estimera l'incertitude venant de la taille finie de l'hydrophone.

7.6 Bruit

Le balayage par l'hydrophone a en général lieu jusqu'à une distance du centre du faisceau telle que le signal ne sorte plus du bruit. Pour appliquer une correction tenant compte de la contribution du bruit à l'intégrale du carré de la tension délivrée par l'hydrophone, il convient d'abord de connaître le niveau de bruit. Cela se fera en répétant le processus de balayage avec le transducteur muet et en mesurant le niveau de bruit efficace en chaque point. Le niveau de bruit efficace, $U_n(l,y,z)$, sera soustrait du signal mesuré de la manière suivante: soit

$$\overline{[U_L(l,y,z,t)]^2}$$

la valeur moyenne du carré du signal délivré par l'hydrophone, la valeur moyenne du signal de l'hydrophone après correction du bruit vaut:

$$\overline{U_L(l,y,z,t)^2} = \overline{[U_L(l,y,z,t)]^2} - U_n^2(l,y,z)$$

7.4 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 may not be necessary to optimise 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. Firstly, the directional response of the hydrophone shall be determined at the frequency f using the procedure outlined in 5.1.3 of IEC 1102. 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 $U_L(l, y, z)$ shall be divided by the factor $D(\Theta_1)$, where $\Theta_1 = \tan^{-1}[(y^2 + z^2)^{1/2}/l]$.

7.5 Finite size of the hydrophone

A hydrophone responds to the integral of the acoustic pressure over its active element, and therefore a correction for spatial averaging may be necessary. 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 (see IEC 866 and [9]). 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 shall be determined from the effective radius of the hydrophone active element which shall be determined using the procedures given in 5.1.4 of IEC 1102. Contributions to the integrations in the planar scanning process [equation (4)] 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 %. An estimate shall be made for the uncertainty caused by the finite size of the active element of the hydrophone.

7.6 Noise

In general, the hydrophone is scanned to a distance from the ultrasonic beam centre where 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 r.m.s. noise level at each point. The r.m.s. noise level, $U_n(l, y, z)$, shall be subtracted from the measured signals in the following manner. If the average value of the square of the hydrophone signal is

$$\overline{[U_L(l, y, z, t)]^2}$$

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

$$\overline{U_L(l, y, z, t)^2} = \overline{[U_L(l, y, z, t)]^2} - U_n^2(l, y, z)$$

Un signal acoustique en dessous du niveau de bruit peut exister à la limite de l'exploration; en ce cas l'importance de la contribution des points extérieurs à la zone explorée, omise dans l'intégration, sera déterminée au moyen d'une modélisation théorique du faisceau acoustique. La pression en un point R du champ lointain d'une source circulaire travaillant en piston plan est proportionnelle à:

$$2J_1(ka_1 \sin \Theta) / (ka_1 \sin \Theta)$$

où

k est le nombre d'onde circulaire

a_1 est le rayon apparent du transducteur ultrasonore

Θ est l'angle entre la droite reliant le point R au centre du transducteur et l'axe d'alignement du faisceau

J_1 est une fonction de Bessel de première espèce et premier ordre

Ce modèle suppose un balayage sphérique, en conséquence de quoi la contribution omise sera déterminée par intégration du carré de cette distribution théorique sur un domaine sphérique délimité par la bordure de la région explorée et comparée avec l'intégrale totale sur un hémisphère. La contribution à l'intégrale de la zone extérieure dans le cas du balayage planaire sera supposée égale à celle fournie par le modèle du balayage sphérique. Cette contribution sera utilisée comme facteur correctif lors de l'intégration et on affectera une incertitude égale à la correction; cette incertitude est en général faible comparativement aux autres.

Il peut être préférable de balayer jusqu'à un certain niveau repéré par rapport au niveau de crête au centre du faisceau, par exemple 10 % en dessous de ce niveau [2] ou 5 % [7]. Dans ce cas la contribution de l'extérieur de la région balayée deviendra significative et on déterminera un facteur correctif comme précédemment.

NOTES

1 On peut utiliser le rayon géométrique du transducteur si le rayon apparent n'est pas connu.

2 L'importance de la contribution du bruit à l'intégration dépend de la méthode de mesurage du signal de l'hydrophone.

7.7 Propagation non linéaire

La méthode du balayage planaire détermine la sensibilité d'un hydrophone à une fréquence particulière f . Il est important que l'onde acoustique ne soit pas distordue et que ne soient pas introduites des composantes de fréquence plus élevées du fait de la propagation non linéaire. On donne ici deux procédures qui permettent d'évaluer l'importance de cette propagation non linéaire dans la méthode du balayage planaire; le choix entre les deux dépend des procédures particulières de mesurage et de l'hydrophone à étalonner. Les deux méthodes supposent fondamentalement que l'incertitude introduite par la distorsion non linéaire dépende de la perte d'amplitude de la fondamentale du spectre de l'onde de pression acoustique. La première méthode suppose que le second harmonique étant à un certain pourcentage, δ , de l'amplitude de la fondamentale, le pourcentage d'erreur sur la détermination de la sensibilité de l'hydrophone est, dans la mesure où $\delta < 30\%$ (voir annexe B):

$$\frac{1}{2} \frac{\delta^2}{100}$$

With the hydrophone at the distance corresponding to the limit of the planar scanning process, an ultrasonic signal below the noise level may 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:

$$2J_1(ka_1 \sin \Theta) / (ka_1 \sin \Theta)$$

where

k is the circular wave number

a_1 is the effective radius of the ultrasonic transducer

Θ is the angle between the line connecting the point R to the centre of the transducer and the beam axis

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 with others.

It may be preferable to scan out to a certain threshold below the peak signal at the centre of the ultrasonic beam, for example, 10 % [2] or 5 % [7]. 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.

NOTES

- 1 The geometrical radius of the ultrasonic transducer may be used instead of the effective radius if the latter is not known.
- 2 The significance of the contribution due to noise to the integration depends on the method of measurement of the hydrophone signal.

7.7 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 annex B)

$$\frac{1}{2} \frac{\delta^2}{100}$$

Si cette méthode est simple, il peut toutefois ne pas être possible de déterminer δ d'une manière fiable du fait de la variation de la sensibilité de l'hydrophone entre la fondamentale et les harmoniques, ou bien, à haute fréquence, parce que l'on n'a pas tenu compte de l'atténuation dans l'eau.

La seconde méthode suppose que l'on peut modéliser la propagation non linéaire dans le cas d'un transducteur fonctionnant en piston plan. Le pourcentage d'erreur dans la détermination de la sensibilité de l'hydrophone est approximativement, ainsi qu'on le montre en annexe B, pour le champ lointain d'un transducteur émettant une onde entretenue de puissance P_0 :

$$P_0 (0,28 R + 0,065) f^4 a_1^2 10^{-20}$$

avec

$$R = l\lambda / \pi a_1^2$$

où f est la fréquence en hertz et a_1 le rayon apparent du transducteur en mètre.

La formule est précise pour une erreur inférieure à 5 % et si l'atténuation est négligée (voir annexe B).

Les estimations ci-dessus sont faites en supposant que le signal à la fréquence du second harmonique n'est pas détecté et que l'effet de l'atténuation sur la propagation non linéaire est faible. Si l'on utilise un hydrophone à la courbe de réponse plate, l'erreur sera surévaluée.

On utilisera la formule ci-dessus pour faire une évaluation qui constituera une limite supérieure de l'erreur due à la distorsion de l'onde sur l'hydrophone. Cette erreur doit être inférieure à 5 %.

7.8 Balayage planaire

Pour être rigoureux, le passage de l'équation (3) à l'équation (4) devrait faire appel à une intégration sur une surface sphérique centrée sur le transducteur [10]. L'erreur introduite en utilisant le balayage planaire en chaque point du balayage est proportionnelle à $(\frac{1}{\cos \Theta} - 1)$, où Θ est l'angle entre l'axe d'alignement du faisceau et la ligne joignant le centre du transducteur et le centre de l'élément actif de l'hydrophone. Dans la mesure où Θ est inférieur à 10° aux extrémités du balayage, l'erreur venant de l'emploi d'un balayage planaire est négligeable, mais on devra évaluer cette erreur pour des angles supérieurs [2].

7.9 Proportionnalité de l'intensité au carré de la pression

L'équation (2) suppose que l'intensité instantanée est proportionnelle au carré de la pression acoustique. On peut estimer la différence entre l'intensité instantanée vraie, I , et l'intensité I_p dérivée du carré de la pression sur l'axe d'un transducteur circulaire fonctionnant en piston plan au moyen de l'équation suivante [10]:

$$\frac{I_p}{I} = \frac{2}{\{1 + (l/a_1) / [1 + (l/a_1)^2]^{1/2}\}} \quad (7)$$

Although a simple procedure, it may not be possible 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 annex B for the far field of a transducer emitting a total power P_o under continuous wave conditions, the percentage error in the determination of the hydrophone sensitivity is approximately

$$P_o (0,28 R + 0,065) f^4 a_1^2 10^{-20}$$

with

$$R = l\lambda / \pi a_1^2$$

where f is the frequency in hertz and a_1 is the effective radius of the transducer in metres.

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

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 these will be over-estimates for the error.

An 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 %.

7.8 Planar scanning

Strictly, the derivation of equation (4) from equation (3) should refer to an integration over a spherical surface centred at the ultrasonic transducer [10]. The error introduced by using planar scanning at each point in the scan is proportional to $(\frac{1}{\cos \Theta} - 1)$, where Θ is the angle between the ultrasonic beam centre and the line joining the centre of the ultrasonic transducer to the 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 [2]. If the angle is larger, an estimate of the uncertainty shall be made.

7.9 Intensity proportional to pressure squared

Equation (2) 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 intensity, I_p , derived from the square of the acoustic pressure on the axis of a circular plane piston ultrasonic transducer may be made from the following equation [10]:

$$\frac{I_p}{I} = \frac{2}{\{1 + (l/a_1) / [1 + (l/a_1)^2]^{1/2}\}} \quad (7)$$

Aux distances de mesurage recommandées en 6.3 et pour la taille des transducteurs généralement utilisés (6 mm à 25 mm), ce rapport ne diffère de 1 que par moins de 1 %. On devra utiliser la formule (7) pour évaluer l'erreur dans le cas de distances inférieures à celles recommandées en 6.3.

For the measurement distances recommended in 6.3 and for the range of transducer diameters normally encountered (6 mm - 25 mm), this ratio differs from unity by less than 1 %. If distances are chosen that are less than those recommended in 6.3, equation (7) shall be used to estimate the contribution from this source of uncertainty.

Annexe A (informative)

On y donne les grandes lignes de l'origine et la justification de quelques unes des conditions et équations utilisées dans cette norme.

A.1 Relation entre les rayons apparents de l'hydrophone et du transducteur

Considérons un transducteur fonctionnant en piston plan de rayon apparent a_1 et un hydrophone de rayon apparent a situé à une distance l du transducteur.

L'onde marginale du transducteur aura une incidence sur l'hydrophone égale à

$$\sin^{-1} \left[\frac{a_1}{(a_1^2 + l^2)^{1/2}} \right]$$

Si l'on suppose que l'hydrophone a une directivité donnée par

$$2J_1(x) / x$$

où $x = k a \sin \theta$ et θ est l'angle d'incidence, on peut raisonnablement demander que les ondes limites aient une incidence correspondant à moins de 1 dB sous la valeur crête de la réponse directionnelle. Ceci requiert pour la réponse directionnelle que $x \leq 1$ (soit $[2J_1(x) / x]_{x=1} \approx 0,88$). Ceci est donc équivalent à

$$k a \sin \theta \leq 1$$

ou

$$\frac{k a a_1}{(a_1^2 + l^2)^{1/2}} \leq 1$$

A.2 Justification de $a_1 / l \leq 0,5$

On peut montrer [10] que l'intensité vraie à une distance l sur l'axe d'une source fonctionnant en piston plan diffère de l'intensité obtenue dans l'hypothèse du carré de la pression d'environ 6 % pour $a_1 / l = 0,5$. Pour des positions axiales plus proches du transducteur, le carré de la pression croît plus rapidement que l'intensité vraie. En conséquence la relation $a_1 / l \leq 0,5$ constitue la limite de validité pour l'équation (2), article 5 de la présente norme.

A.3 Obtention de l'équation (6), article 5

Considérons la distribution de points $U_L(l, r)$ entre R_{1l} et R_{2l} qui sont les distances par rapport au centre du faisceau des extrémités du l ème balayage diamétral. Soit s la distance entre le centre du faisceau et le point le plus proche de celui-ci. Considérant que chaque point contribue à un élément annulaire, l'intégration du balayage diamétral donné par

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

Annex A (informative)

An outline of the derivation and justification of some of the conditions and equations used in this International Standard are given here.

A.1 Relationship between hydrophone and transducer effective radii

Consider a plane piston transducer of effective radius a_1 and a hydrophone of effective radius a 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

$$\sin^{-1} \left[\frac{a_1}{(a_1^2 + l^2)^{1/2}} \right]$$

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

$$2J_1(x) / x$$

where $x = k \sin \Theta$ and Θ is the angle of incidence, then a reasonable requirement is that 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 $x \leq 1$ (i.e. $[2J_1(x) / x]_{x=1} \approx 0,88$). Hence, this is equivalent to

$$k \sin \Theta \leq 1$$

or

$$\frac{k a a_1}{(a_1^2 + l^2)^{1/2}} \leq 1$$

A.2 Justification for $a_1 / l \leq 0,5$

It can be shown [10] that the true intensity at an axial distance l from a plane piston source differs from the intensity determined assuming the "pressure squared" relationship by approximately 6 % for $a_1 / l = 0,5$. At axial positions closer to the transducer, the "pressure squared" intensity rapidly increases compared with the true intensity. Consequently, the limit of validity of equation (2), clause 5, for the purposes of this standard is taken as $a_1 / l \leq 0,5$.

A.3 Derivation of equation (6), clause 5

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

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

Toutefois, le point central $U_L(l,s)$ ne contribue pas à un anneau centré sur le centre du faisceau de la même manière que les autres points. Dans ce cas en effet, les contributions des deux demi-cylindres du point central doivent être prises en considération séparément. La contribution totale du point $U_L(l,s)$ à la sommation vaut:

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

Comme l'équation (1) contient déjà un terme relatif au point $U_L(l,s)$, il est nécessaire d'appliquer un facteur correctif à l'équation (1), lequel est la différence entre la vraie contribution du point central et celle contenue dans (1), soit:

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

qui se réduit à

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

Ceci est le dernier terme de l'équation (6), article 5.

Si le point $U_L(l,s)$ correspond au centre du faisceau, alors $s = 0$ et l'équation (6) de l'article 5 se réduit à:

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

NOTE - Comme le terme à l'intérieur de la sommation se réduit à zéro pour le point au centre du faisceau ($r = 0$ pour $U_L(l,0)$), c'est le terme de droite qui correspond à la contribution du centre du faisceau.

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

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

As equation (1) already contains a term for the point $U_L(l,s)$, it is necessary to apply a correction to equation (1) given by the difference between the true contribution from the centre point and the term included in equation (1), i.e.

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

which reduces to

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

This is the last term in equation (6), clause 5.

If the point $U_L(l,s)$ corresponds to the centre of the beam then $s = 0$ and equation (6), clause 5, reduces to

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

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.

Annexe B (informative)

On décrit ci-dessous la manière dont est obtenue l'équation donnée en 7.7 relatif à la propagation non linéaire.

Le modèle consistant à considérer que le lobe d'émission est une gaussienne est une approximation utile du champ d'amplitude finie issu d'un émetteur fonctionnant en piston plan relevé à des distances supérieures à ou de l'ordre de la distance normalisée $R = \lambda / \pi a_1^2$.

Pour de faibles distorsions, le rapport de l'amplitude de la fondamentale à l'amplitude qui serait présente sans distorsion sur l'axe acoustique vaut (équations (1) et (2) de [14]):

$$1 - \frac{\sigma^2}{8}$$

avec

$$\sigma = \left(\frac{7 p_1 \pi^2 a_1^2}{\lambda^2 \rho c^2} \right) 2 \sin \left(\frac{1}{2R} \right) (1 + R^2)^{1/2} \text{Ln}[R + (1 + R^2)^{1/2}]$$

où p_1 est l'amplitude de la pression acoustique sur la face du transducteur qui est reliée à la puissance totale P_o par:

$$P_o = \frac{\pi p_1^2 a_1^2}{4 \rho c}$$

L'amplitude de la pression en dehors de l'axe et aux faibles amplitudes ($\sigma < 0,5$) est obtenue en multipliant σ par la fonction de directivité du transducteur [15], qui suppose donc un profil gaussien. Dans cette hypothèse la racine carrée de l'intégrale du carré de la pression acoustique en l'absence de distorsion vaut:

$$\left\{ \frac{2\pi \int \left[1 - \left(\frac{\sigma^2}{4} \right) \exp \left(- \frac{2r^2}{a_1^2 (1 + R^2)} \right) \right] \exp \left(- \frac{2r^2}{a_1^2 (1 + R^2)} \right) r dr}{2\pi \int \exp \left(- \frac{2r^2}{a_1^2 (1 + R^2)} \right) r dr} \right\}^{1/2} = 1 - \frac{\sigma^2}{16}$$

Annex B (informative)

The derivation of the equation given in 7.7 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, $R = \lambda / \pi a_1^2$, 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 (equations (1) and (2) of reference [14]):

$$1 - \frac{\sigma^2}{8}$$

with

$$\sigma = \left(\frac{7 p_1 \pi^2 a_1^2}{\lambda^2 \rho c^2} \right) 2 \sin \left(\frac{1}{2R} \right) (1 + R^2)^{1/2} \ln[R + (1 + R^2)^{1/2}]$$

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

$$P_o = \frac{\pi p_1^2 a_1^2}{4 \rho c}$$

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 [15] 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:

$$\left\{ \frac{2\pi \int \left[1 - \left(\frac{\sigma^2}{4} \right) \exp \left(- \frac{2r^2}{a_1^2 (1 + R^2)} \right) \right] \exp \left(- \frac{2r^2}{a_1^2 (1 + R^2)} \right) r dr}{2\pi \int \exp \left(- \frac{2r^2}{a_1^2 (1 + R^2)} \right) r dr} \right\}^{1/2} = 1 - \frac{\sigma^2}{16}$$

ce qui conduit à un pourcentage d'erreur dans l'étalonnage de l'hydrophone de:

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

Lorsque R est dans l'étendue de 0,5 à 3 cette formule peut être approximée par celle donnée en 7.7.

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

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

If R is in the range 0,5 to 3, then this formula can be approximated by the form given in 7.7.

Annexe C (informative)

Pour servir de guide dans la détermination des incertitudes d'étalonnage des hydrophones au moyen de la technique de balayage planaire, les tableaux C.1 et C.2 donnent les diverses contributions à l'incertitude totale selon [2] et [5]. L'incertitude totale dérive de la somme des carrés des diverses composantes.

Tableau C.1 – Contributions maximales à l'incertitude de l'étalonnage de l'hydrophone dans la bande de fréquences de 1 MHz à 10 MHz réalisé selon la méthode de balayage planaire selon [2]. Les valeurs entre parenthèses ont trait à l'erreur systématique

NOTE - Les incertitudes ne sont pas calculées en [2] comme décrit dans le présent document.

Source	Incertainitude %
Puissance totale	±2,5
Tension de la source	±2,0
Atténuation dans l'eau	±1,2
Signal de l'hydrophone	±4
Echantillonnage réduit pour l'intégration	±1
Réponse directionnelle	±0 (+3,9)
Taille finie de l'élément actif de l'hydrophone	±1
Omission dans l'intégration	±0 (+2,2)
Propagation non linéaire	-
Balayage planaire	±0
Intensité (proportionnelle au carré de la pression)	±0 (-3)
TOTAL	±6 (+3,1)

Annex C (informative)

As a guide to the uncertainties involved in the calibration of hydrophones based on the planar scanning technique, tables C.1 and C.2 give the individual contributions to the total uncertainty according to references [2] and [5]. The total uncertainty is based on a sum of the squares of the individual components.

Table C.1 – Maximum contributions to the uncertainty of hydrophone calibration in the frequency range 1 MHz to 10 MHz based on planar scanning according to reference [2]. Values given in brackets refer to the systematic bias

NOTE - Uncertainties are calculated in reference [2] in a different manner to that used here.

Source	Uncertainty %
Total power	±2,5
Source voltage	±2,0
Water attenuation	±1,2
Hydrophone signal	±4
Finite sampling in integration	±1
Directional response	±0 (+3,9)
Finite size of hydrophone active element	±1
Omission in integration	±0 (+2,2)
Nonlinear propagation	–
Planar scanning	±0
Intensity (proportional to pressure ²)	±0 (–3)
TOTAL	±6 (+3,1)

Tableau C.2 – Contributions à l'incertitude de l'étalonnage par la méthode du balayage planaire selon [5]. Les incertitudes non mentionnées sont supposées être inférieures à 1 % et ont été prises en compte pour l'incertitude totale

Source / Fréquence	Incrtitude %		
	1 MHz	5 MHz	15 MHz
Puissance totale – mesurage – stabilité	±2,5 ±1	±2,5 ±1	±7 ±4,5
Atténuation dans l'eau	±0,2	±1,5	±7
Signal de l'hydrophone	±2	±2	±2
Echantillonnage fini<	±1	<±1	<±1
Réponse directionnelle	<±1	<±1	<±1
Taille finie de l'élément	<±1	<±1	<±1
Omission dans l'intégration	±2	±2	±2
Propagation non linéaire	<±1	±1,5	±9
Balayage planaire	<±1	<±1	<±1
Intensité (proportionnelle au carré de la pression)	<±1	<±1	<±1
Divers (confiance 99 %)	±3	±3	±10
TOTAL	±6	±6	±18

Table C.2 – Contributions to the uncertainty and the total uncertainty in the hydrophone calibration based on planar scanning according to reference [5]. Where uncertainties are not given in the references, then they are assumed to be less than 1 % and this figure has been used for the determination of total uncertainty

Source / Frequency	Uncertainty %		
	1 MHz	5 MHz	15 MHz
Total power – measurement	±2,5	±2,5	±7
– stability	±1	±1	±4,5
Water attenuation	±0,2	±1,5	±7
Hydrophone signal	±2	±2	±2
Finite sampling in integration	<±1	<±1	<±1
Directional response	<±1	<±1	<±1
Finite size of hydrophone active element	<±1	<±1	<±1
Omission in integration	±2	±2	±2
Nonlinear propagation	<±1	±1,5	±9
Planar scanning	<±1	<±1	<±1
Intensity (proportional to pressure ²)	<±1	<±1	<±1
Random (99 % confidence)	±3	±3	±10
TOTAL	±6	±6	±18

Bibliographie / Bibliography

- [1] K. Brendel and G. Ludwig, *Calibration of ultrasonic standard probe transducers*, *Acustica*, 36, 203-208 (1976).
- [2] B.A. Herman and G.R. Harris, *Calibration of miniature ultrasonic receivers using a planar scanning technique*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 72, 1357-1363 (1982).
- [3] S.M. Jones, P.L. Carson, R.A. Banjavic and C.R. Meyer, *Simplified technique for the calibration and use of a miniature hydrophone in intensity measurements of pulsed ultrasonic fields*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 70, 1220-1228 (1981).
- [4] W.B. Gloersen, G.R. Harris, H.F. Stewart and P.A. Lewin, *A comparison of two calibration methods for ultrasonic hydrophone*, *Ultrasound Med. Biol.*, 8, 545-548 (1982).
- [5] R.C. Preston, A.J. Livett and D.R. Bacon, *Absolute calibration of hydrophones in the frequency range 0,5 MHz to 15 MHz*, *Proc. Inst. Acoustics*, 6, pt 5, 60-67 (1984).
- [6] P.R. Fischella and P.L. Carson, *Assessment of errors in intensity measurements of pulse echo ultrasound using miniature hydrophones*, *Med. Phys.*, 6, 404-411 (1979).
- [7] AIUM/NEMA, *Safety standard for diagnostic ultrasound equipment*, AIUM/NEMA Standard Publication No. UL 1-1981.
- [8] D.R. Bacon, *The improvement and evaluation of a laser interferometer for the absolute measurement of ultrasonic displacements in the frequency range up to 15 MHz*, National Physical Laboratory, Acoustics Report Ac. 109 (1986).
- [9] K. Beissner, *Maximum hydrophone size in ultrasonic field measurements*, *Acustica* 59, 61-66 (1985).
- [10] K. Beissner, *On the plane-wave approximation of acoustic intensity*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 71, 1406-1411 (1982).
- [11] P.A. Lewin, *Introduction to underwater acoustics*, B & K Application Note, Copenhagen (1975).
- [12] J.M.M. Pinkerton, *The absorption of ultrasonic waves in liquids and its relation to molecular constitution*, *Proc. Phys. Soc.*, 62, 129-141 (1949).
- [13] S.S. Corbett, *The influence of non-linear fields on miniature hydrophone calibration using the planar scanning technique*, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectrics and Freq. Contr.*, 35, 162-167 (1988).
- [14] D.R. Bacon, *A new method for ultrasonic hydrophone calibration*, *Proc. 1982 IEEE Ultrasonics Symp.*, 700-704 (1982).
- [15] J.C. Lockwood, T.G. Muir and D.T. Blackstock, *Directive harmonic generation in the radiation field of a circular piston*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 53, 1148-1153 (1973).

ICS 17.140.50
