

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Underwater acoustics – Calibration of acoustic wave vector receivers in the frequency range 5 Hz to 10 kHz

Acoustique sous-marine – Étalonnage des récepteurs vectoriels d'ondes acoustiques dans la plage de fréquences de 5 Hz à 10 kHz

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63305:2024



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2024 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

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

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

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 500 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 25 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 500 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 25 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Underwater acoustics – Calibration of acoustic wave vector receivers in the frequency range 5 Hz to 10 kHz

Acoustique sous-marine – Étalonnage des récepteurs vectoriels d'ondes acoustiques dans la plage de fréquences de 5 Hz à 10 kHz

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 17.140.50

ISBN 978-2-8322-8123-9

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

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms and definitions	8
4 List of symbols	14
5 Relationship of vector quantities in sound field	16
6 General procedures for calibration.....	17
6.1 General calibration requirements	17
6.1.1 Types of calibration	17
6.1.2 Acoustic field requirements.....	17
6.2 Acoustic standing wave tube requirements.....	18
6.2.1 Requirements for standing wave tube [8]	18
6.2.2 Requirements for immersed depth of transducers	19
6.3 Acoustic travelling wave tube requirements.....	20
6.3.1 Requirements for driving signal	20
6.3.2 Requirements for the travelling wave tube	20
6.4 Equipment requirements	20
6.4.1 Calibration facility	20
6.4.2 Instrumentation.....	21
6.5 Positioning and alignment.....	23
6.5.1 Coordinate system.....	23
6.5.2 Reference direction	23
6.5.3 Transducer mounting and support.....	23
6.5.4 Alignment	24
6.6 Representation of the frequency response	25
6.7 Frequency limitations.....	25
6.7.1 High-frequency limit.....	25
6.7.2 Low frequency limit.....	25
6.8 Checks for acoustic interference	26
7 Electrical measurements.....	26
7.1 Signal type.....	26
7.2 Electrical earthing	26
7.3 Measurement of transducer output voltage.....	26
7.3.1 General	26
7.3.2 Signal analysis	27
7.3.3 Electrical loading by measuring instrument	27
7.3.4 Electrical loading by extension cables	27
7.3.5 Electrical noise	27
7.3.6 Cross-talk	28
7.3.7 Integral preamplifiers	28
7.4 Measurement of projector drive current.....	28
7.4.1 Instrumentation.....	28
7.4.2 Signal analysis	28
8 Preparation of measurement.....	28
8.1 Preparation of transducers.....	28

8.1.1	Soaking	28
8.1.2	Wetting	29
8.2	Environmental conditions (temperature and depth)	29
9	Free-field calibration	29
9.1	Free-field reciprocity calibration	29
9.1.1	General	29
9.1.2	Principle	30
9.1.3	Measurement	32
9.1.4	Uncertainty	32
9.2	Free-field calibration using optical interferometry	32
9.2.1	General	32
9.2.2	Principle	32
9.2.3	Measurement	33
9.2.4	Uncertainty	34
9.3	Free-field calibration using a reference hydrophone	34
9.3.1	General	34
9.3.2	Principle	34
9.3.3	Measurement	35
9.3.4	Uncertainty	35
10	Calibration in standing wave tube	35
10.1	Calibration using reference accelerometer	35
10.1.1	General	35
10.1.2	Principle	35
10.1.3	Measurement	37
10.1.4	Uncertainty	37
10.2	Comparison calibration using reference hydrophone in standing wave tube	37
10.2.1	General	37
10.2.2	Principle	37
10.2.3	Measurement	39
10.2.4	Uncertainty	39
10.3	Horizontal standing wave tube calibration	39
10.3.1	General	39
10.3.2	Principle	39
10.3.3	Measurement	41
10.3.4	Uncertainty	41
10.4	Calibration using optical interferometry in standing wave tube	41
10.4.1	General	41
10.4.2	Principle	41
10.4.3	Measurement	43
10.4.4	Uncertainty	43
11	Calibration in a travelling wave tube	43
11.1	General	43
11.2	Principle	44
11.2.1	General	44
11.2.2	Establishment of a unidirectional, plane progressive wave field	45
11.2.3	Sensitivity calculations	48
11.2.4	Uncertainty	48
12	Reporting of results	48

12.1	Sensitivity	48
12.2	Sensitivity level	49
12.3	Environmental considerations for calibration	49
12.4	Calibration uncertainties	49
12.5	Auxiliary metadata	49
13	Recalibration periods	50
Annex A	(informative) Directional response of a vector receiver	51
A.1	General principle	51
A.2	Types of measurement implementation	51
A.3	Coordinate system	51
A.4	Measurement of vector receiver directional response	51
A.5	Calculation of angular deviation loss	52
A.6	Uncertainty	52
Annex B	(informative) Inertial vector receiver calibration using optical interferometry in air	53
B.1	General	53
B.2	Principle	53
B.3	Procedure	53
B.4	Discussion	55
Annex C	(informative) Assessment of uncertainty of vector receiver calibration	56
C.1	General	56
C.2	Type A evaluation of uncertainty	56
C.3	Type B evaluation of uncertainty	56
C.4	Reported uncertainty	56
C.5	Common sources of uncertainty	57
Bibliography		60
Figure 1	– The structure of the calibration chamber	19
Figure 2	– Co-vibrating vector receiver suspended on a mounting ring	24
Figure 3	– Measurement framework for free-field reciprocity calibration of the vector receiver	30
Figure 4	– Schematic diagram of free-field calibration for vector receiver using an optical interferometer	33
Figure 5	– Schematic diagram of free-field comparison calibration for vector receiver using reference hydrophone	34
Figure 6	– Schematic diagram of vertical standing wave tube calibration using reference accelerometer	36
Figure 7	– Schematic diagram of vertical standing wave tube calibration using reference hydrophone	38
Figure 8	– Schematic diagram of calibration principle and horizontal standing wave tube calibration	40
Figure 9	– Schematic diagram of calibration for vector receiver using optical interferometer in standing wave tube	42
Figure 10	– Schematic diagram of calibration for vector receiver in a travelling wave tube	44
Figure B.1	– Schematic diagram of calibration using optical interferometer in air for inertial vector receiver	54

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

UNDERWATER ACOUSTICS – CALIBRATION OF ACOUSTIC WAVE VECTOR RECEIVERS IN THE FREQUENCY RANGE 5 Hz TO 10 kHz

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 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 63305 has been prepared by IEC technical committee 87: Ultrasonics. It is an International Standard.

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

Draft	Report on voting
87/839/FDIS	87/843/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.

NOTE Words 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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63305:2024

INTRODUCTION

Unlike traditional piezoelectric **hydrophones** which are sensitive to sound pressure, **vector receivers** measure **sound particle** motion (velocity, acceleration or displacement) or **sound pressure gradient**, and have strongly **directional response** in their working frequency range. The calibration of these **vector receivers** which measure **sound particle** motion or **sound pressure gradient** is considered in this document.

The output voltage of a **vector receiver** channel to be calibrated is proportional to the **sound particle** motion or **sound pressure gradient** at the reference centre of the receiver. The directivity of the **vector receiver** channel is independent of acoustical frequency, and the ratio of the output voltage of the receiver channel at angle θ to the maximum output voltage on the axial direction is equal to $|\cos\theta|$ [1]¹.

Recent developments of **acoustic wave vector receivers** for ocean acoustics, such as those that measure **sound particle velocity**, have led to a number of commercial systems being made available on the market. In addition to providing sensors which possess some useful directivity for low-frequency applications, they are increasingly used for measurement of underwater noise exposure for marine fauna that are sensitive to sound particle motion rather than sound pressure (for example, fish and invertebrates). However, calibration of such sensors poses technical challenges, and is not covered by the existing international standards such as IEC 60565 [2], [3]. Building on work begun in China and Russia [4], where a successful bilateral comparison has recently been concluded, this work establishes an International Standard on calibration of **vector receivers** in the frequency range 5 Hz to 10 kHz.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

UNDERWATER ACOUSTICS – CALIBRATION OF ACOUSTIC WAVE VECTOR RECEIVERS IN THE FREQUENCY RANGE 5 Hz TO 10 kHz

1 Scope

Usually, **acoustic wave vector receivers** are designed and constructed based on one of two principles. One is the sound pressure difference (gradient) principle. When measuring with this sensor, the **vector receiver** is rigidly fixed on a mount and supported in water. The other is the co-vibrating (**inertial**) principle. When measuring with this sensor, the **vector receiver** is suspended on a mount and supported in water in a non-rigid manner, which allows the **vector receiver** co-vibrate in the same direction as the **sound particle** in the sound wave field.

Many methods have been used to calibrate **vector receivers**, such as free-field calibration, calibration in standing wave tube and calibration in a travelling wave tube. This document specifies methods and procedures for calibration of **vector receivers** in the frequency range 5 Hz to 10 kHz, which are applicable to **vector receivers** based on the two different principles. In addition, it describes an absolute method of **inertial vector receiver** calibration in air using optical interferometry.

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 60500:2017, *Underwater acoustics – Hydrophones – Properties of hydrophones in the frequency range 1 Hz to 500 kHz*

IEC 60565-1:2020, *Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration of hydrophones, Part 1: Procedures for free-field calibration of hydrophones*

ISO 80000-8:2020, *Quantities and units – Part 8: Acoustics*

ISO 18405:2017, *Underwater acoustics – Terminology*

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

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60500:2017, IEC 60565-1:2020, ISO 80000-8:2020, ISO 18405:2017 and the following apply.

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

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

3.1**sound particle
material element**

smallest element of the medium that represents the medium's mean density

[SOURCE: ISO 80000-8:2020, 3.1]

3.2**sound particle displacement**

δ

displacement of a **sound particle** caused by the action of sound

Note 1 to entry: **Sound particle displacement** is a function of time, t , which is indicated by means of an argument t , as in $\delta(t)$.

Note 2 to entry: **Sound particle displacement** is expressed in metres, m.

Note 3 to entry: **Sound particle displacement** is a vector quantity. Spatial components of the **sound particle displacement** can be indicated by assigning subscripts to the symbol. For example, in Cartesian coordinates, $\delta = (\delta_x, \delta_y, \delta_z)$. By convention in underwater acoustics, the z axis is usually chosen to point vertically down from the sea surface, with x and y axes in the horizontal plane. If the **sound particle displacement** is in the same direction in which the sound wave propagates, its symbol can be simply δ .

[SOURCE: ISO 18405:2017, 3.1.2.9, modified – In the definition, "material element" has been replaced by "sound particle".]

3.3**sound particle velocity**

u

contribution to velocity of a **sound particle** caused by the action of sound

Note 1 to entry: **Sound particle velocity** is a function of time, t , which is indicated by means of an argument t , as in $u(t)$.

Note 2 to entry: For small-amplitude sound waves in an otherwise stationary medium, the **sound particle velocity** and **sound particle displacement** are related by

$$u(t) = \frac{\partial \delta(t)}{\partial t} \quad (1)$$

where $\delta(t)$ is the **sound particle displacement** at time, t , and the partial derivative is evaluated at a fixed position.

Note 3 to entry: **Sound particle velocity** is expressed in units of metre per second, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Note 4 to entry: **Sound particle velocity** is a vector quantity. Spatial components of the **sound particle velocity** can be indicated by assigning subscripts to the symbol. For example, in Cartesian coordinates, $u = (u_x, u_y, u_z)$. By convention in underwater acoustics, the z axis is usually chosen to point vertically down from the sea surface, with x and y axes in the horizontal plane. If the **sound particle velocity** is in the same direction in which the sound wave propagates, its symbol can be simply u .

[SOURCE: ISO 18405:2017, 3.1.2.10, modified – In the definition, "material element" has been replaced by "sound particle".]

3.4**sound particle acceleration**

a

contribution to acceleration of a **sound particle** caused by the action of sound

Note 1 to entry: **Sound particle acceleration** is a function of time, t , which is indicated by means of an argument t , as in $a(t)$.

Note 2 to entry: For small-amplitude sound waves in an otherwise stationary medium, the **sound particle acceleration** and **sound particle velocity** are related by

$$a(t) = \frac{\partial u(t)}{\partial t} \quad (2)$$

where $u(t)$ is the **sound particle velocity** at time, t , and the partial derivative is evaluated at a fixed position.

Note 3 to entry: **Sound particle acceleration** is expressed in units of metre per second squared, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Note 4 to entry: **Sound particle acceleration** is a vector quantity. Spatial components of the **sound particle acceleration** can be indicated by assigning subscripts to the symbol. For example, in Cartesian coordinates, $a = (a_x, a_y, a_z)$. By convention in underwater acoustics, the z axis is usually chosen to point vertically down from the sea surface, with x and y axes in the horizontal plane. If the **sound particle acceleration** is in the same direction in which the sound wave propagates, its symbol can be simply a .

[SOURCE: ISO 18405:2017, 3.1.2.11, modified – In the definition, "material element" has been replaced by "sound particle".]

3.5

sound pressure gradient

∇p

spatial derivative of sound pressure with respect to distance caused by the action of sound

Note 1 to entry: **Sound pressure gradient** is expressed in units of pascal per metre, $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$.

Note 2 to entry: **Sound pressure gradient** is a vector quantity. In Cartesian coordinates, spatial components of the **sound pressure gradient** can be indicated as $\nabla p = (\partial p / \partial x, \partial p / \partial y, \partial p / \partial z)$. By convention in underwater acoustics, the z axis is usually chosen to point vertically down from the sea surface, with x and y axes in the horizontal plane.

3.6

vector receiver

acoustic wave vector receiver

receiving transducer whose output voltage of its receiving channel is proportional to the **sound particle** motion (displacement, velocity or acceleration) or **sound pressure gradient** on the position of the reference centre of it in water

Note 1 to entry: Due to the different constructions, the **vector receiver** can be one-dimensional **vector receiver**, two-dimensional orthogonal **vector receiver** or three-dimensional orthogonal **vector receiver**, and it has different receiving channels. For a three-dimensional orthogonal **vector receiver**, the channels are usually named as x -channel, y -channel and z -channel.

Note 2 to entry: The receiving channel of the **vector receiver** has very strong **directional response**, which is independent of the frequency.

Note 3 to entry: According to the vector values which are perceived, there are different **vector receivers**, including **inertial vector receiver** and **sound pressure gradient receiver**.

Note 4 to entry: Sometimes, the **vector receiver** has a sound pressure (scalar) receiving channel, and open-circuit voltage of the sound pressure channel is proportional to the sound pressure on the position of the reference centre of the **vector receiver**.

Note 5 to entry: The phase of the output signal of the vector receiving channel changes by 180 degrees when the direction of sound wave incidence changes to the opposite direction, which can be found using the output signal of a sound pressure receiving channel as a reference signal when the **vector receiver** has a sound pressure receiving channel in it.

3.7

inertial vector receiver

receiving transducer that senses **sound particle** motion by measuring the reaction of a proof mass in response to motion of the sensor body (e.g. accelerometer, geophone)

3.8**hydrophone**

electroacoustic transducer that produces electrical voltages in response to water borne sound pressure signals

[SOURCE: IEC 60500:2017, 3.17, modified – In the definition, "electrical signals" has been replaced with "electrical voltages", and "pressure signals" with "sound pressure signals".]

3.9**sound pressure gradient receiver**

receiving transducer that senses the gradient of sound pressure using two or more **hydrophones** separated by distances that are small relative to the wavelength

3.10**directional response**

<of a **vector receiver** channel> description of the response of a **vector receiver** channel, as a function of the direction of propagation of the incident plane sound wave, in a given channel direction through the reference centre, at a specified frequency

Note 1 to entry: The **directional response** pattern is usually presented in the form of a two-dimensional polar graph. The scale of the polar can be in terms of sensitivity level or in angular deviation loss (see Annex A).

Note 2 to entry: The **directional response** pattern of the **vector receiver** channel is a cosine function, that is the ratio of the output voltage of the **vector receiver** channel in the direction of angle θ to the maximum output voltage in the axial direction is equal to $|\cos \theta|$.

[SOURCE: IEC 60500:2017, 3.4, modified – In the definition, "hydrophone" has been replaced with "vector receiver channel", "a specified plane" has been replaced with "a given channel direction", and ", generally presented graphically," has been deleted.]

3.11**axial angular deviation loss**

larger value of **directional response** of a **vector receiver** channel on the principal axis minus another value of **directional response** on the symmetrical direction

Note 1 to entry: The **axial angular deviation loss** is expressed as a level in decibels, dB (see Annex A).

Note 2 to entry: Sometimes, the **axial angular deviation loss** is named as asymmetry or maximum heterogeneity of **directional response** on the principal axis of a **vector receiver** channel.

3.12**lateral angular deviation loss**

larger value of **directional response** of a **vector receiver** channel on the principal axis minus the smaller value of **directional response** on the lateral axis

Note 1 to entry: The **lateral angular deviation loss** is expressed as a level in decibels, dB (see Annex A).

3.13**sound particle displacement sensitivity**

$$\underline{M}_{\delta}$$

<of a **vector receiver** channel> quotient of the Fourier transform of the output voltage signal $\mathcal{F}(U_{VR}(t))$ of a **vector receiver** channel to the Fourier transform of the **sound particle displacement** signal $\mathcal{F}(\delta(t))$, for specified frequency and specified direction of plane wave sound incidence on the position of the reference centre of the **vector receiver** in the undisturbed free field if the **vector receiver** was removed

$$\underline{M}_{\delta} = \frac{\mathcal{F}(U_{VR}(t))}{\mathcal{F}(\delta(t))} \quad (3)$$

Note 1 to entry: The **sound particle displacement sensitivity** of a **vector receiver** is a complex-valued parameter. The **sound particle displacement sensitivity** calculated by this equation is in the direction of the sound wave propagation. This calibration procedure can be performed for only one aligned channel, and each channel of the **vector receiver** is calibrated independently.

Note 2 to entry: The modulus of the **sound particle displacement sensitivity** is expressed in units of volt per metre, $V \cdot m^{-1}$.

Note 3 to entry: The phase angle of the **sound particle displacement sensitivity** is expressed in radians and represents the phase difference between the output voltage of a **vector receiver** and the **sound particle displacement** (see IEC 60500).

3.14 sound particle displacement sensitivity level

$L_{M,\delta}$

twenty times the logarithm to the base 10 of the ratio of the modulus of the **sound particle displacement sensitivity** $|\underline{M}_{\delta}|$ of a **vector receiver** channel to a reference value of sensitivity, $M_{\delta,ref}$, in decibels

$$L_{M,\delta} = 20 \log_{10} \frac{|\underline{M}_{\delta}|}{M_{\delta,ref}} \text{ dB} \quad (4)$$

Note 1 to entry: The unit of **sound particle displacement sensitivity level** is expressed as a level in decibels, dB.

Note 2 to entry: The reference value of sensitivity, $M_{\delta,ref}$, is $1 V \cdot pm^{-1}$.

3.15 sound particle velocity sensitivity

$\underline{M}_u$

<of a **vector receiver** channel> quotient of the Fourier transform of the output voltage signal $\mathcal{F}(U_{VR}(t))$ of a **vector receiver** channel to the Fourier transform of the **sound particle velocity** signal $\mathcal{F}(u(t))$, for specified frequency and specified direction of plane wave sound incidence on the position of the reference centre of the **vector receiver** in the undisturbed free field if the **vector receiver** was removed

$$\underline{M}_u = \frac{\mathcal{F}(U_{VR}(t))}{\mathcal{F}(u(t))} \quad (5)$$

Note 1 to entry: The **sound particle velocity sensitivity** of **vector receivers** is a complex-valued parameter. The **sound particle velocity sensitivity** calculated by this equation is in the direction of the sound wave propagation. This calibration procedure can be performed for only one aligned channel, and each channel of the **vector receiver** is calibrated independently.

Note 2 to entry: The modulus of the **sound particle velocity sensitivity** is expressed in units of volt second per metre, $V \cdot s \cdot m^{-1}$.

Note 3 to entry: The phase angle of the **sound particle velocity sensitivity** is expressed in radians and represents the phase difference between the output voltage of a **vector receiver** and the **sound particle velocity** (see IEC 60500).

3.16**sound particle velocity sensitivity level** $L_{M,u}$

twenty times the logarithm to the base 10 of the ratio of the modulus of the **sound particle velocity sensitivity** $|M_u|$ of a **vector receiver** channel to a reference value of sensitivity, $M_{u,ref}$, in decibels

$$L_{M,u} = 20 \log_{10} \frac{|M_u|}{M_{u,ref}} \text{ dB} \quad (6)$$

Note 1 to entry: The unit of **sound particle velocity sensitivity level** is expressed as a level in decibels, dB.

Note 2 to entry: The reference value of sensitivity, $M_{u,ref}$, is $1 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{nm}^{-1}$.

3.17**sound particle acceleration sensitivity** M_a

<of a **vector receiver** channel> quotient of the Fourier transform of the output voltage signal $\mathcal{F}(U_{VR}(t))$ of a **vector receiver** channel to the Fourier transform of the **sound particle acceleration** signal $\mathcal{F}(a(t))$, for specified frequency and specified direction of plane wave sound incidence on the position of the reference centre of the **vector receiver** in the undisturbed free field if the **vector receiver** was removed

$$M_a = \frac{\mathcal{F}(U_{VR}(t))}{\mathcal{F}(a(t))} \quad (7)$$

Note 1 to entry: The **sound particle acceleration sensitivity** of **vector receivers** is a complex-valued parameter. The **sound particle acceleration sensitivity** calculated by this equation is in the direction of the sound wave propagation. This calibration procedure can be performed for only one aligned channel, and each channel of the **vector receiver** is calibrated independently.

Note 2 to entry: The modulus of the **sound particle acceleration sensitivity** is expressed in units of volt second squared per metre, $\text{V} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1}$.

Note 3 to entry: The phase angle of the **sound particle acceleration sensitivity** is expressed in radians and represents the phase difference between the output voltage of a **vector receiver** and the **sound particle acceleration** (see IEC 60500).

3.18**sound particle acceleration sensitivity level** $L_{M,a}$

twenty times the logarithm to the base 10 of the ratio of the modulus of the **sound particle acceleration sensitivity** $|M_a|$ of a **vector receiver** channel to a reference value of sensitivity, $M_{a,ref}$, in decibels

$$L_{M,a} = 20 \log_{10} \frac{|M_a|}{M_{a,ref}} \text{ dB} \quad (8)$$

Note 1 to entry: The unit of **sound particle acceleration sensitivity level** is expressed as a level in decibels (dB).

Note 2 to entry: The reference value of sensitivity, $M_{a,ref}$, is $1 \text{ V} \cdot \text{s}^2 \cdot \mu\text{m}^{-1}$.

3.19

sound pressure gradient sensitivity

$\underline{M}_{pg}$

<of a **vector receiver** channel> quotient of the Fourier transform of the output voltage signal $\mathcal{F}(U_{VR}(t))$ of a **vector receiver** channel to Fourier transform of the **sound pressure gradient** signal $\mathcal{F}(\nabla p(t))$, for specified frequency and specified direction of plane wave sound incidence on the position of the reference centre of the **vector receiver** in the undisturbed free field if the **vector receiver** was removed

$$\underline{M}_{pg} = \frac{\mathcal{F}(U_{VR}(t))}{\mathcal{F}(\nabla p(t))} \quad (9)$$

Note 1 to entry: The **sound pressure gradient sensitivity** of **vector receivers** is a complex-valued parameter. The **sound pressure gradient sensitivity** calculated by this equation is in the direction of the sound wave propagation. The calibration procedure can be performed for only one aligned channel, and each channel of the **vector receiver** is calibrated independently.

Note 2 to entry: The modulus of the **sound pressure gradient sensitivity** is expressed in units of volt metre per pascal, $\text{V} \cdot \text{m} \cdot \text{Pa}^{-1}$.

Note 3 to entry: The phase angle of the **sound pressure gradient sensitivity** is expressed in radians and represents the phase difference between the output voltage of a **vector receiver** and the **sound particle velocity** (see IEC 60500).

3.20

sound pressure gradient sensitivity level

$L_{M,pg}$

twenty times the logarithm to the base 10 of the ratio of the modulus of the **sound pressure gradient sensitivity** $|\underline{M}_{pg}|$ of a **vector receiver** channel to a reference value of sensitivity, $M_{pg,ref}$, in decibels

$$L_{M,pg} = 20 \log_{10} \frac{|\underline{M}_{pg}|}{M_{pg,ref}} \text{ dB} \quad (10)$$

Note 1 to entry: The unit of **sound pressure gradient sensitivity level** is expressed as a level in decibels, dB.

Note 2 to entry: The reference value of sensitivity $M_{pg,ref}$ is $1 \text{ V} \cdot \text{m} \cdot \mu\text{Pa}^{-1}$.

3.21

acoustic waveguide

apparatus for the guided transmission of sound within the confines of predetermined boundaries

4 List of symbols

a **sound particle acceleration**

a_0 acceleration of the projector surface

A acoustic pressure amplitude of wave travelling in the $+\hat{x}$ direction in a travelling wave tube

B acoustic pressure amplitude of wave travelling in the $-\hat{x}$ direction in a travelling wave tube

c	speed of sound in water
c_f	speed of sound in free-field
c_t	speed of sound in standing wave tube
d_0	diameter of vector receiver
D	inner diameter of a tube or acoustic waveguide
E	Young's modulus of the standing wave tube chamber
e_a	output voltage of reference accelerometer
E_0	bulk elastic modulus of water
f	acoustic frequency
h_0	immersed depth of hydrophone in water
h	immersed depth of vector receiver in water
$\underline{I}_P$	electrical current through projector ²
$\underline{I}_T$	electrical current through transducer
j	square root of minus one
k	acoustic wavenumber, $k = 2\pi f / c$
K_i	sensitivity coefficient of optical interferometer
K_{a-w}	coefficient of converting the sensitivity in air to the sensitivity in water
L	length of acoustic waveguide in a tube
$L_{M,a}$	sound particle acceleration sensitivity level of a vector receiver
$L_{M,pg}$	sound pressure gradient sensitivity level of a vector receiver
L_p	sound pressure sensitivity level of a hydrophone
$L_{M,u}$	sound particle velocity sensitivity level of a vector receiver
$L_{M,\delta}$	sound particle displacement sensitivity level of a vector receiver
$\underline{M}_a$	sound particle acceleration sensitivity of a vector receiver
$\underline{M}_p$	sound pressure sensitivity of a hydrophone
$\underline{M}_{pg}$	sound pressure gradient sensitivity of a vector receiver
$\underline{M}_u$	sound particle velocity sensitivity of a vector receiver
$\underline{M}_\delta$	sound particle displacement sensitivity of a vector receiver
$\underline{M}_0$	sound pressure sensitivity of reference hydrophone
p_h	sound pressure of depth h in the standing wave tube
p_i	sound pressure observed by the i th reference hydrophone in a travelling wave tube
∇p	sound pressure gradient
P_0	sound pressure magnitude in a travelling wave tube
r	distance between projector and receiver
R	reflection coefficient magnitude of active impedance in a travelling wave tube
s_{ea}	sensitivity of reference accelerometer

² The underscore in the symbol of quantity signifies that it is a complex-valued parameter.

S	area
$\underline{S}$	travelling wave tube transfer matrix
$\underline{S}_{I,P}$	transmitting response to current of a projector
$\underline{S}_{I,T}$	transmitting response to current of a reciprocal transducer
t	time
T	thickness of the standing wave tube chamber
U_i	open-circuit voltage output of the i th reference hydrophone in a travelling wave tube
U_O	output voltage of optical interferometer
$U_{P,j}$	drive voltage supplied to the j th acoustic projector in a travelling wave tube
U_{VR}	output voltage of vector receiver channel
U_0	output voltage of reference hydrophone or hydrophone pair
u	sound particle velocity
x_i	axial coordinate of the i th reference hydrophone in a travelling wave tube
$\underline{Z}_{PG}$	electrical transfer impedance of projector and vector receiver
$\underline{Z}_{TG}$	electrical transfer impedance of transducer and vector receiver
$\underline{Z}_{PT}$	electrical transfer impedance of projector and transducer
δ	sound particle displacement
ω	radian frequency
λ	wavelength of sound in water
ρ	density of an acoustic medium
ϕ_{PG}	phase angle of electrical transfer impedance of projector and vector receiver
ϕ_{TG}	phase angle of electrical transfer impedance of reciprocal transducer and vector receiver
ϕ_{PT}	phase angle of electrical transfer impedance of projector and reciprocal transducer

5 Relationship of vector quantities in sound field

The linear Euler's equation valid for acoustic processes of small amplitude is as follows.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla p \quad (11)$$

where u is the **sound particle velocity** in the acoustic wave, ρ is the density of medium, and ∇p is the **sound pressure gradient**. The **sound particle velocity** can be calculated as follows.

$$u = -\frac{1}{\rho} \int \nabla p dt \quad (12)$$

The relationship of **sound pressure gradient**, **sound particle velocity**, **sound particle displacement** and **sound particle acceleration** can be calculated through Formulas (1), (2),

(3), (5), (7), (9) and (12), and the relationship of their sensitivities can be determined from the **sound particle velocity sensitivity** $\underline{M}_u$ as follows [1], [5], [6]:

$$\begin{aligned}\underline{M}_a &= \frac{1}{j\omega} \underline{M}_u \\ \underline{M}_{pg} &= \frac{j}{\rho\omega} \underline{M}_u \\ \underline{M}_\delta &= j\omega \underline{M}_u\end{aligned}\tag{13}$$

6 General procedures for calibration

6.1 General calibration requirements

6.1.1 Types of calibration

Two general types of calibration are covered within the scope of this document.

- Absolute calibration without relation to a measurement of the same kind.

Free-field reciprocity calibration and calibration using optical interferometry are described here. Free-field reciprocity calibration is based upon the principle of acoustic reciprocity, with the method requiring three electroacoustic transducers, at least one of which shall be a reciprocal transducer. Calibration using optical interferometry is based on the measurement of physical parameters, such as **sound particle velocity**, **sound particle acceleration**, and **sound particle displacement**, which are determined by the principle of laser vibration measurement and are traceable to the wavelength of the laser light. The above are primary calibration methods, traceable to primary electrical or length standards, which are capable of achieving high accuracy.

NOTE 1 For **inertial vector receiver**, it also can be calibrated in air using optical interferometry (see Annex B).

- Relative calibration using a calibrated acoustic reference transducer or accelerometer.

The calibrations are performed by comparison to another acoustic transducer or accelerometer which has already been calibrated, for example by absolute methods given in IEC 60565-1:2020 [2] and IEC 60565-2:2019 [3]. The accuracy of this kind of calibration is typically dependent on the calibration uncertainty of the reference accelerometer or transducer.

NOTE 2 Using a **hydrophone** to calibrate the **sound particle acceleration** (or velocity or displacement) sensitivity of a **vector receiver** is likely to be a primary method, and their definitions are provided in ISO/IEC Guide 99:2007 [7]. However, the uncertainty of the **hydrophone** calibration is higher than the uncertainty of accelerometer (or velocity or displacement) calibration. For that reason, the calibrations using **hydrophones** are defined as relative calibration in this document.

6.1.2 Acoustic field requirements

For the free-field calibrations to be valid, the following general requirements shall be satisfied:

- acoustic free-field conditions, requiring minimal influence from acoustic reflections from medium boundaries (see IEC 60565-1:2020, 5.2);
- acoustic far-field conditions, requiring a sufficient separation distance between projector and receiver (see IEC 60565-1:2020, 5.3);
- acoustic steady-state conditions, requiring any transient behaviour displayed by resonant transducers to have died down (see IEC 60565-1:2020, 5.4).

For the standing wave tube calibrations to be valid, the following general requirements shall be satisfied:

- acoustic standing wave field conditions, requiring the rational design of the calibration chamber to create acoustic standing wave with enough signal-to-noise ratio in the rigid-walled tube, especially at the lowest frequencies (see 6.2.1);
- immersed depth conditions, requiring the standing wave to be produced in the calibration chamber (see 6.2.2).

For the travelling wave tube calibrations to be valid, the following general requirements shall be satisfied:

- acoustic signal-to-noise ratio conditions, requiring the sufficiently large signal-to-noise ratio in the **acoustic waveguide** of travelling wave tube, especially at the lowest frequencies (see 6.3.1);
- acoustic travelling wave sound field conditions, requiring the rational design of the calibration tube to create a unidirectional, plane progressive sound wave and requiring the travelling wave tube wall to be rigid relative to the acoustic medium (water) (see 6.3.2).

6.2 Acoustic standing wave tube requirements

6.2.1 Requirements for standing wave tube [8]

The structure of the calibration chamber of a vertical standing wave tube is shown in Figure 1. It is usually made of stainless steel with an open upper end. When continuous signals are employed, a projector at the bottom of the tube chamber vibrates sinusoidally, and sound signals are projected vertically up to the surface and reflected from the upper water-air interface to create the standing wave sound field in the tube.

The diameter of the chamber shall be larger than the mounting ring and **vector receiver** (see Figure 2) to be immersed into the calibration chamber with minimal influence on the standing wave sound field. To produce a compressive plane wave in the tube, the diameter shall be less than one-third of the wavelength. The wall of the calibration chamber is rigid relative to the medium (water) inside the chamber.

To create the standing wave sound field, the relationship of the inner diameter D and thickness T of the stainless steel calibration chamber of a vertical standing wave tube shall satisfy the following requirement:

$$\frac{2T}{D} \geq 0,4$$

For a standing wave tube calibration, the sound distribution at the given depth of the standing wave tube shall be homogeneous, and its deviation shall be less than 0,7 dB.

During the calibration, the signal-to-noise ratio shall be greater than 20 dB, and an electrodynamic (or moving-coil) transducer, not a piezoelectric transducer, is recommended at the lowest frequencies.

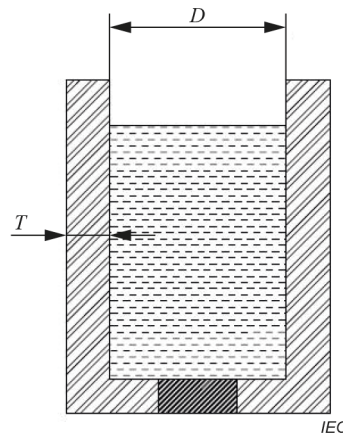


Figure 1 – The structure of the calibration chamber

6.2.2 Requirements for immersed depth of transducers

For calibration, a **vector receiver** (and a reference **hydrophone**) are immersed into a vertical standing wave tube to a depth h under the water with sinusoidal excitation of the calibration chamber. The depth h shall be measured with an uncertainty of less than 2 %.

At the top of the standing wave tube, the air–water surface is a pressure release boundary, where the relationship of particle velocity and sound pressure can be calculated as

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial u}{\partial h} \right|_{h=0} &= 0 \\ p|_{h=0} &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

The output voltage from the **vector receiver** channel to be calibrated is the cosine function expression of the product of acoustic wavenumber k and immersed depth h . If $kh = 0,5(n + 1) \pi$ ($n = 0, 2, 4, \dots$), the output voltage of the receiver channel is equal to zero.

If a reference **hydrophone** is used, its open-circuit voltage is the sine function expression of the product of acoustic wavenumber k and immersed depth h . If $kh = n\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), the open-circuit output voltage of the reference **hydrophone** is equal to zero also.

To avoid these occurrences, the depth h of the **vector receiver** and h_0 of the reference **hydrophone** immersed in the vertical standing wave tube shall be immersed far away from the above positions.

The acoustic wavenumber k is determined by acoustic frequency f and sound speed c_t of water in standing wave tube. If the maximum value of the sound pressure can be found at the immersed depth of $h_{\max}$, and $h_{\max}$ is on the position of a quarter of wavelength of the sound wave, then the sound speed can be calculated by:

$$c_t = 4h_{\max}f$$

At low frequencies, the wavelength of the sound wave is so large that the sound speed is hard to measure in the limited length of the calibration chamber. Usually, the sound speed is measured at relatively high frequency, and its value can be applied in the whole frequency range of interest. The error of sound speed estimation shall be considered in the measurement uncertainty.

The sound speed in the calibration chamber also can be calculated as follows:

$$c_t = \frac{c_f}{\sqrt{1 + \frac{2E_0}{E} \cdot \frac{D}{2T}}}$$

where c_f is the sound speed of the medium in an acoustic free-field, E is the Young's modulus of the chamber, E_0 is the bulk elastic modulus of the chamber, T is the thickness of the chamber.

6.3 Acoustic travelling wave tube requirements

6.3.1 Requirements for driving signal

Signals used during establishment of the plane progressive wave field and during **vector receiver** calibrations shall be continuous and time-harmonic.

The signal-to-noise ratio of continuous, time-harmonic signals used for the calibration of **vector receivers** shall be larger than 20 dB.

NOTE The travelling wave tube includes methods to minimize the transmission of ground-borne vibration into the **acoustic waveguide**.

6.3.2 Requirements for the travelling wave tube

The travelling wave tube shall produce unidirectional, plane progressive sound waves inside a fluid-filled **acoustic waveguide**. The diameter of the **acoustic waveguide** shall be sufficiently small that radial and azimuthal acoustic normal modes are not supported. This condition is satisfied when $kD/2 \ll 1$, where D is the **acoustic waveguide** diameter and k is the acoustic wavenumber. The travelling wave tube shall be constructed such that the walls are rigid relative to the acoustic medium.

The travelling wave tube can be oriented vertically, horizontally or at any other angle to suit the laboratory. A system of internal rails or any other method for the installation of **vector receivers** to be calibrated on the longitudinal axis of the **acoustic waveguide** should be included.

The travelling wave tube can provide a method to control the temperature or hydrostatic pressure of the acoustic medium inside the **acoustic waveguide**, or both. A method to evacuate air from the **acoustic waveguide** should be provided.

The sound speed and density of the medium should be measured. The acoustic medium in a travelling wave tube includes additives to prevent freezing of the medium at low temperature.

6.4 Equipment requirements

6.4.1 Calibration facility

The calibration facility used shall be capable of realizing the acoustic requirements specified in 6.1.2 over the desired range of acoustic frequencies and for the **vector receiver** types under test.

The free-field calibration facility shall enable at least two transducers at a time to be positioned reproducibly at a known separation distance and aligned for calibration in conformance with the requirements of 6.1.2.

NOTE 1 The most common type of free-field calibration facility is based around a water-filled test tank constructed from concrete, steel or wood (leading to the tank being reverberant due to the reflective boundary) with or without an anechoic material. Such a facility gives convenient access, precise positioning of devices (by use of a rigid support framework or positioning system), and control over the environmental conditions. However, the finite size of the test tank limits the frequency range to be calibrated, unless sophisticated signal processing techniques are used.

The standing wave tube facility shall enable a **vector receiver** or a **hydrophone** or both to be immersed in the standing wave tube at a known depth and fixed for calibration in conformance with the requirements of 6.2.2.

NOTE 2 The standing wave tube calibration facility has two types: vertical standing wave tube and horizontal standing wave tube, usually made of stainless steel. The vertical standing wave tube is a cylindrical tube with upper end open and a projector equipped at the bottom of the tube to create the vertical standing wave sound field. The horizontal standing wave tube is a cylindrical tube with a hole open for installation of the transducers and two ends equipped with projectors to form the horizontal standing wave sound field.

6.4.2 Instrumentation

6.4.2.1 General

The following measuring instrumentations are required to perform a calibration of **vector receiver**. All shall have a performance that covers the desired acoustic frequency range for calibrations (this is a maximum frequency range from 5 Hz to 10 kHz, but can be a narrower range depending on the application).

6.4.2.2 Signal source

This shall be used to provide the electrical signal to drive projectors and provide the trigger used for synchronizing the signal acquisition by the digitizer.

NOTE Typically, the signal source will provide a maximum output of only a few volts, but will provide a range of signal types, including gated-bursts of single frequency.

6.4.2.3 Power amplifier

This is used to drive the transducer with sufficient electrical power to generate sound wave signals at the **vector receiver** which are at least 20 dB higher than the ambient noise in the facility.

NOTE 1 Typically, a power amplifier capable of 100 W output power is sufficient for most **vector receiver** calibration purposes, but higher power performance is required for specialized applications.

NOTE 2 Typically, the power amplifier will have a low electrical output impedance; but, alternatively, it is possible that the output electrical impedance of power amplifier is matched to the transducer for maximum power delivery.

6.4.2.4 Current measuring instrument

This shall be used if the electrical drive current through the projector is measured (for example, during a free-field reciprocity calibration). This should consist of a calibrated current transformer which provides an output voltage proportional to electrical current (with the voltage then measured by the digitizer along with the output voltage of the **vector receiver** or open-circuit voltage of the **hydrophone**).

NOTE As an alternative, a calibrated impedance (e.g. resistor or capacitor) and voltmeter can be used.

6.4.2.5 Preamplifier

For passive sensors, a preamplifier is required to amplify the electrical voltage output from the **vector receiver** or **hydrophone**, and shall have electrical input impedance greater than output impedance of the **vector receiver** or **hydrophone** by at least a factor of 100.

NOTE 1 Typically, the preamplifier will have selectable voltage gain and selectable electronic filtering; alternatively, filtering can be accomplished by use of a separate dedicated unit, or be achieved digitally in post-processing.

NOTE 2 Commonly, a **vector receiver** has a built-in integral preamplifier, as for a **hydrophone**, in which case a separate preamplifier is not necessary.

6.4.2.6 Filter

Where out-of-band noise interferes with the measurement, a filter can be used on the electrical voltage output from the **vector receiver** or **hydrophone** after amplification by the preamplifier.

NOTE 1 If the signal-to-noise ratio is low or the out-of-band noise interferes with the measurement, the filter can be used to increase the quality of the signals.

NOTE 2 The filter can be designed for high-pass, low-pass or band-pass, with different out-of-band attenuation slope such as 12 dB/oct, 24 dB/oct, and 48 dB/oct, and the band-pass filter is commonly used.

NOTE 3 If an analogue filter is not available, a digital filter can be used instead.

6.4.2.7 Digitizer

The digitizer used shall be an analogue-to-digital converter (ADC) or digitizing oscilloscope, which captures a digital record of the electrical signals during calibration (e.g. output voltage of the **vector receiver** channel, voltage from the current transformer, etc).

The sampling rate of the digitizer shall be at least two and a half times the maximum frequency of interest, and the resolution shall be sufficient for accurate recording of the signal without quantization errors for the applicable signal-to-noise, with a recommended minimum resolution of 8 bit. The digitizer shall be capable of being externally triggered (typically by the signal source or computer). When making absolute electrical measurements, the digitizer shall be calibrated over the range of operation.

6.4.2.8 Optical interferometer

The optical interferometer shall be used to measure the motion of the pellicle for the free field calibration and the water surface for the standing wave tube calibration. In the calibration frequency range, the optical interferometer shall have stable frequency response of sensitivity. The dynamic range of the optical interferometer shall be 100 dB or larger in order to achieve the accurate measurement of **sound particle velocity**.

NOTE It is possible that the output voltage of the optical interferometer has several scales for motion measurement in different situations to achieve good waveform for display and acquisition.

6.4.2.9 Computer controller

The calibration shall be controlled by a computer running appropriate acquisition software which controls the digitizer and signal acquisition and can also provide the trigger for the signal source.

NOTE 1 The software will typically be used to undertake the required signal analysis, including the time-windowing and calculation of the amplitude of the recorded signals. However, some of these functions can be undertaken using the on-board processing available on a digitizing oscilloscope.

NOTE 2 Although some of the above measurement tasks are still capable of being performed manually (for example, using an analogue oscilloscope), this practice is not encouraged.

6.4.2.10 Projector

A number of transducers are required for use as projectors during calibrations. For example, calibration by three-transducer free-field reciprocity requires at least two transducers in addition to the device under test (see 9.1), and comparison calibration by use of a calibrated reference **hydrophone** and an auxiliary projector for use in generating a suitable acoustic free-field (see 9.3).

At low frequencies, calibration using a reference accelerometer in vertical standing wave tube requires a transducer used as projector at the bottom of the tube in addition to the device under test (see 10.1), and comparison calibration by use of a calibrated reference **hydrophone** requires a projector for use in generating a suitable standing sound wave field (see 10.2).

NOTE A number of different transducers will be used to cover a wide frequency range. This is especially true for projectors which have a limited frequency range due to their inherently resonant behaviour.

6.4.2.11 Reference hydrophone

Hydrophone which is stable and calibrated by an absolute calibration method with low measurement uncertainties, such as free-field reciprocity method, vibrating column method, and acoustic coupler method, etc. It can be used for calibration of the **vector receivers** by relative calibration method.

6.4.2.12 Reference accelerometer

Accelerometer which is stable and calibrated by an absolute calibration method with low measurement uncertainties. It can be used for measurement of the acceleration on the surface of the projector at the bottom of the tube chamber.

6.5 Positioning and alignment

6.5.1 Coordinate system

The angular coordinate system chosen shall be that specified by IEC 60500:2017.

6.5.2 Reference direction

Before calibration, a reference direction shall be defined for each transducer. Unless there is good reason, the reference direction shall be chosen to be coincident with the principal axis of the transducers, as defined in IEC 60500:2017.

NOTE For the **vector receiver**, it is possible to have one, two or three orthogonal reference directions.

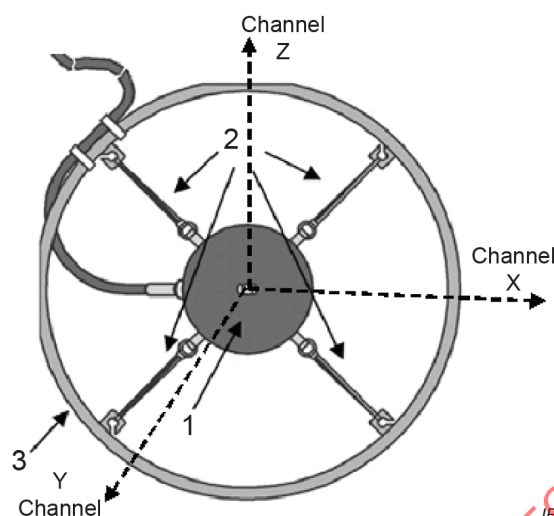
6.5.3 Transducer mounting and support

If the mount is considered to influence the measured sensitivity, the vector receiver shall be calibrated in the same mount that will be used when the device is deployed for measurements made in the field. Where the device is thought to be sensitive to the type of support or mount, a description of the mounting arrangement shall be stated with the results.

Each projector and **hydrophone** shall be firmly attached to a mount and support which enables the devices to be positioned accurately and reproducibly at fixed points in the water. This is also the same for the mounting and support of the **sound pressure gradient receiver**.

For the **inertial vector receiver**, the receiver shall be suspended on a calibration bracket (such as mounting ring) using elastic materials (such as rubber) (see Figure 2), and the calibration bracket shall be firmly attached to a mount and support [4], [9].

The supporting mount for transducers shall be chosen to cause minimal influence on the measured sensitivity, as far as is commensurate with the above requirement for precise positioning of the transducers.



Key

- 1 three-dimensional **vector receiver**
- 2 rubber
- 3 mounting ring

Figure 2 – Co-vibrating vector receiver suspended on a mounting ring

If a rotational stage is incorporated into the support framework or positioning system, the mount shall enable a transducer to be positioned with its reference centre located along the axis of rotation.

NOTE 1 The size of the mounting ring used for suspension is larger than the **vector receiver** to minimize its influence on the vibration of the **vector receiver**.

NOTE 2 Other ways for suspension of the **inertial vector receiver** can also be used. It is important that the resonant frequency of the suspension system (including mounting ring, elastic material, and **inertial vector receiver**) is less than the frequency range of interest (by at least one octave).

NOTE 3 Some transducers are more susceptible than others to the influence of the method of mounting. To avoid the influence from the mount, it is advisable to avoid air-filled supports or poles. Where possible, it is advisable to use free-flooding supports such as hollow poles, constructed from carbon-fibre or plastic.

NOTE 4 Care can also be taken to minimize the amount of structure borne noise which will probably be picked up by the mount and supporting framework and communicated to the transducers.

6.5.4 Alignment

Before each acoustic measurement during the calibration in free-field, the relevant transducer pair (for example, a projector and **vector receiver**) shall be positioned at the same water depth and oriented such that the reference directions of the transducers are aligned.

During standing wave tube calibration, the reference direction is along the axial direction of the calibration chamber. For the symmetrical **vector receiver** to be calibrated, its reference direction shall be vertically oriented to the projector at the bottom of the calibration chamber.

NOTE 1 This alignment can be performed either mechanically using special mounting poles or rigging, or by use of an automated positioning system (for example, consisting of stepper motors and controllers).

NOTE 2 Note that the lengths of the mounting poles to the reference centre of the **vector receiver** or **hydrophone** are carefully measured so that they can be immersed precisely to the same depth.

NOTE 3 For transducers that show appreciable directivity about their principal axis, the transducers can be aligned acoustically by looking for the maximum received signal at a specific frequency. Sometimes the reference direction is chosen at an angle of the **directional response** pattern where the response does not change significantly with the directional angle, for a specific frequency. Note that if a reference direction is chosen this way, the same direction is then chosen for all frequencies.

NOTE 4 For acoustic alignment between two transducers (by searching for the maximum received signal at a specific frequency), a minimum of two degrees of freedom are used for each transducer mount: vertical displacement in the water to enable the transducer depths to be modified; and rotation about a vertical axis which goes through the transducer reference centre by use of a rotational stage incorporated into the support framework or positioning system.

6.6 Representation of the frequency response

The number of acoustic frequencies chosen for calibration shall ensure that the performance of **vector receiver** is well characterized over the desired frequency range.

6.7 Frequency limitations

6.7.1 High-frequency limit

For free-field calibration, the main limitation at high frequencies is the working frequency of a **vector receiver**. At present, the maximum acoustic frequency of an ideal **vector receiver** is around 10 kHz. But it will be decreased because of the resonance of the shell in the case of inappropriate design.

For standing wave tube calibration, the main limitation at high frequencies is the diameter of the tube chamber, which shall be smaller than a quarter of wavelength of the maximum acoustic frequency. In addition, the size of the mounting ring shall be small enough to minimize the influence on the sound wave field.

For travelling wave tube calibrations, the main limitation at high frequencies is determined by the diameter of the **acoustic waveguide**. When the diameter is greater than about one third of a wavelength, the sound field is no longer uniform in a cross-section plane [1].

NOTE The method cannot be used at frequencies greater than the upper frequency limit, which is imposed by the radial or azimuthal acoustic modes that can appear when the **acoustic waveguide** diameter is not small relative to an acoustic wavelength. Radial and azimuthal acoustic modes cause acoustic pressure gradients in the plane normal to the **acoustic waveguide** axis, so that the output level of the **vector receiver** and of the reference **hydrophones** depend on their radial and azimuthal positions in the **acoustic waveguide**.

6.7.2 Low frequency limit

For free-field calibration, the main limitations at low frequencies are the quality factor of the projector and echo-free time of the test tank. For most test tank facilities of minimum dimension five metres or greater, the practical low frequency limit for **hydrophone** calibration is near to 1 kHz (see IEC 60565-1:2020, Annex E). In addition, the sound wave signal level produced by the projector is reduced as the frequency is lowered, the signal-to-noise ratio eventually falling below 20 dB, thereby limiting the minimum frequency for calibrations.

NOTE 1 For continuous signals in anechoic tanks, the performance of the anechoic lining degrades at low frequencies, limiting the ability to achieve free-field conditions.

NOTE 2 The lower frequency limit for free-field calibration in reverberant tanks can be extended by use of sophisticated signal processing techniques [10], [11], [12], [13], [15].

For standing wave tube calibration, the main limitation at low frequencies is the low signal-to-noise ratio, so that the projector at the bottom of the tube chamber cannot transmit a signal large enough to reach the signal-to-noise ratio of 20 dB.

For travelling wave tube calibration, the main limitation at low frequencies is determined by the spacing and distance sampled by the reference **hydrophones** and the signal-to-noise ratio inside the **acoustic waveguide**.

NOTE 3 The method cannot be used at frequencies lower than the low-frequency limit, which is imposed by either the loss of transmitting sensitivity of the acoustic projectors and commensurate reduction in the signal-to-noise ratio inside the **acoustic waveguide**, or the phase gradient along the length spanned by the reference **hydrophones** cannot be resolved due to uncertainties in the axial displacements x_i or phase responses of the reference **hydrophones**.

6.8 Checks for acoustic interference

For calibrations in an acoustic free-field using tone-burst signals, a tone-burst repetition rate shall be chosen so that all reverberation in the tank attenuates to lower than the direct signal at least 40 dB before transmission of the next pulse. With continuous signals in a standing wave tube, the duration time of signals shall be long enough to produce a standing wave. The interference level from acoustic signals shall be at least 30 dB lower than the signal level.

NOTE 1 Further details on the influence of reflections are given in IEC 60565-1:2020, Annex E.

NOTE 2 Where smooth periodic ripples can be observed in a plot of electrical transfer impedance (or sensitivity) against frequency, this is an indication that there are likely to be acoustic reflections present leading to constructive and destructive interference effects. If the frequency interval between successive peaks in the plot is Δf and c is the speed of sound in the medium, the path difference Δd between the direct and reflected signals arriving at the receiving transducer can be calculated from $\Delta d = c/\Delta f$.

NOTE 3 The oscillations caused by a reflected acoustic signal with a path difference can be eliminated by sophisticated signal processing techniques, such as CMWA method, signal-modelling method, FDFP method and TDS method [10], [11], [12], [13], [15].

7 Electrical measurements

7.1 Signal type

The default electrical signal used for the calibration is either continuous wave (sinusoidal) or tone burst (gated sine wave).

Whatever signal type is chosen, the requirements of 6.1.2 still apply. Note that requirements for achieving an acoustic free-field will vary depending on the signal type used.

NOTE Other signal types are possible, such as short broadband pulses or frequency modulated chirps. The signal analysis techniques for such signals can be used to determine the signal amplitude (and phase) as a function of frequency. Where signal analysis is undertaken by Fourier transform, the frequency resolution will depend on the signal record length.

7.2 Electrical earthing

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

7.3 Measurement of transducer output voltage

7.3.1 General

The output voltage of the **hydrophone** and **vector receiver** shall be measured at the end of the cable. The electrical terminals selected shall be specified (see IEC 60500:2017).

For tone-burst signals, the **hydrophone** and **vector receiver** voltage waveform shall be digitized, for example using a digitizing oscilloscope or a computer-based analogue-to-digital converter.

For a continuous wave signal, the measurement shall be done using a voltmeter with high electrical input impedance, or by a digitizing oscilloscope or a computer-based analogue-to-digital converter.

Where an amplifier, attenuator or filter is used in combination with the voltmeter or digitizer to form an absolute measuring channel, these elements shall be calibrated. However, a calibration is unnecessary if the same measuring channel is used only for the measurement of voltage ratios, though in this case, the linearity of this channel shall still be determined.

When measuring voltage ratios, both voltages shall be expressed in the same metric (for example, both as peak voltages or both as root-mean-square voltages).

7.3.2 Signal analysis

For tone-burst signals, the signal amplitude (and if required, signal phase) shall be determined from the time-windowed voltage waveform of **vector receiver** channel or **hydrophone**, with the time window positioned on the steady-state portion of the echo-free signal. The start of time window shall be positioned on the waveform after the projector has achieved a steady state, and the end of the window shall be positioned before the arrival of the first reflected signal or before the end of the direct signal (whichever occurs first). (See IEC 60565-1:2020, Annex E)

7.3.3 Electrical loading by measuring instrument

During the measurements, the **hydrophone** or **vector receiver** without a built-in preamplifier shall be connected to a high electrical input-impedance measuring instrument (preamplifier, voltmeter, oscilloscope or digitizer) such that the electrical input impedance is much larger than the electrical impedance of the **vector receiver** or **hydrophone** (ideally, more than 100 times larger).

When measuring the phase angle of the output voltage of the receiving transducer, the electrical input impedance of the measuring instrument shall ideally be more than 1 000 times the electrical impedance of the receiving transducer.

Where the electrical impedance of the receiving transducer is high, consideration shall be given to the electrical loading of the receiving transducer by the measuring instrument. In such cases, electrical loading corrections shall be applied to the measured voltage to obtain the open-circuit voltage (see IEC 60565-1:2020, Annex C).

7.3.4 Electrical loading by extension cables

If an extension cable of significant length is attached to the **hydrophone**, this cable will electrically load the **hydrophone** and corrections shall be applied to obtain the open-circuit end-of-cable **hydrophone** voltage (see IEC 60565-1:2020, Annex C).

7.3.5 Electrical noise

The signal-to-noise ratio shall be sufficient that the measurements can be made without significant loss of accuracy. The measured sound values should be at least 20 dB greater than the equivalent bandwidth noise pressure (see IEC 60500:2017).

The level of broad-band interfering noise can be reduced by the use of a band-pass filter. However, the bandwidth shall be sufficiently wide to allow the signal to pass through without distortion.

NOTE 1 The level of electrical noise degrades the accuracy when making electrical measurements. The signal-to-noise ratio is likely to be lower when using projectors at frequencies well below resonance.

NOTE 2 In the presence of electrical noise, the signal-to-noise ratio can be improved by coherent averaging of repeated signals. For random noise, averaging signals (N times) will improve the signal-to-noise ratio by a factor of $\sqrt{N}$ (square root of N).

7.3.6 Cross-talk

In the presence of coherent interference from electrical cross-talk, signal averaging and narrow-band filtering will not in general lead to an improvement in accuracy. Therefore, in such cases, efforts shall be made to determine the cause of the problem and steps shall be taken to minimize the effects by suitable electrical grounding, for example of the projector drive cables.

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

Where cross-talk is present with tone-burst signals, this will only cause interference if the length of the burst is greater than the acoustic propagation delay. If the cross-talk cannot be eliminated by suitable grounding, the length of the burst shall be reduced so that there is no overlap in time with the acoustic signal.

7.3.7 Integral preamplifiers

Usually, a **vector receiver** has a built-in integral preamplifier, and the sensitivity of the **vector receiver** shall be expressed as end-of-cable sensitivity (including the performance of the preamplifier as part of the device). This is also the case for the **hydrophone** with a built-in integral preamplifier.

7.4 Measurement of projector drive current

7.4.1 Instrumentation

The current through the projector shall be determined by a calibrated current transformer (producing a voltage proportional to the drive current).

For tone-burst signals, the voltage waveform from the current transformer shall be digitized, for example using a digitizing oscilloscope or a computer-based analogue-to-digital converter.

For a continuous wave signal, the voltage from the current transformer shall be measured using a voltmeter of high electrical input impedance, or by a digitizing oscilloscope or a computer-based analogue-to-digital converter.

Where an amplifier, attenuator or filter, or both are used in combination with the voltmeter or digitizer to form an absolute measuring channel, these elements shall be calibrated, unless the same measuring channel is also used only for the measurement of voltage ratio.

NOTE Although the current transformer is the preferred instrument, an alternative method is to measure the voltage drop across a small-valued calibrated resistor (value of only a few ohms) or other calibrated impedance (e.g. capacitor) in series with the projector.

7.4.2 Signal analysis

For tone-burst signals, the signal amplitude (and if required, signal phase) shall be determined from the time-windowed voltage waveform from the current transformer, with the time window positioned on the steady-state portion of the echo-free signal. The start and end of the time window shall be positioned on the waveform at the same positions chosen for the receiving transducer voltage (see 7.3.2).

8 Preparation of measurement

8.1 Preparation of transducers

8.1.1 Soaking

Before calibration, the transducers shall be soaked to allow equalization of temperature with the water.

If the air temperature where the transducers are stored and prepared is close to that of the water (as would be the case for an indoor test tank), the length of soaking time can be a few minutes. However, for cases where the water temperature is significantly lower than the air temperature in the laboratory (as might be the case for an open-water facility in winter conditions), a soaking time of at least 30 minutes is recommended.

8.1.2 Wetting

A wetting agent such as a mild detergent, which reduces the surface tension of the water and hinders the adhesion of bubbles to the surface, shall be applied to the whole transducer surface to mitigate the effect of gas bubbles or trapped air clinging to its surface, before immersion in water. No dry patches shall be visible on the wetted transducer when it is immersed and then quickly removed from the water.

NOTE The process of air bubbles attaching to the transducer surface is more evident when immersing warm transducers into cold water because the warmer transducers have a slight heating effect on the colder water in contact with the transducer surface, causing dissolved gas to come out of solution (air is less soluble in warm water than in cold water).

8.2 Environmental conditions (temperature and depth)

Where the sensitivity of a **vector receiver** is required for specific conditions of water temperature and depth of immersion, the **vector receiver** shall either:

- 1) be calibrated under the same conditions of temperature and depth for which it will be used in the field; or
- 2) have corrections made to sensitivity values to account for the different environmental conditions, with corrections based on earlier calibrations as a function of temperature or depth, or by use of validated analytical models.

NOTE 1 The sensitivity of some **vector receivers** can vary with both ambient temperature and depth of immersion (due to increased hydrostatic pressure). The ability to conduct calibration under a range of values of temperature and depth is relatively rare and specialized facilities are used.

NOTE 2 The environmental conditions that exist in an indoor test tank facility can not completely replicate the conditions that exist in the ocean (for example, for water temperature or depth). Calibrations are strictly valid only for the conditions that pertain during the calibration. If an estimate is required of the performance under ocean conditions, it is important to correct the sensitivity obtained from the tank calibration (with a suitable uncertainty component added to reflect the uncertainty in the correction).

NOTE 3 For measurements made in open-water facilities, the environmental conditions (water temperature or depth) cannot be the same as those for the intended end-user application. If an estimate is required of the performance under the conditions that pertain to the end-user application, it is important to correct the sensitivity obtained from the open-water facility (with a suitable uncertainty component added to reflect the uncertainty in the correction).

9 Free-field calibration

9.1 Free-field reciprocity calibration

9.1.1 General

This method describes an absolute calibration of free-field reciprocity calibration for **vector receivers**. Based upon the principle of acoustic reciprocity, three electroacoustic transducers shall be used, at least one of which shall be a reciprocal transducer. The method can be used in the frequency range 250 Hz to 10 kHz in a laboratory water tank. It is a primary method for calibration of the receiving channel of **vector receivers** [4], [14], [16], [17], [18], [19], [20].

NOTE Usually, to obtain the free-field sensitivity for the frequencies below one or two kilohertz in a laboratory water tank, sophisticated signal processing techniques can be applied, such as CMWA, FDFP, TDS and so on [10], [11], [12], [13], [15].

9.1.2 Principle

Three transducers are used for free-field reciprocity calibration. For convenience, the transducers can be labelled as P (projector), G (**vector receiver**) and T (reciprocal transducer), and the transducers shall be paired off in three measurement configurations, as shown in IEC 60565-1:2020.

Figure 3 shows the measurement framework for free-field reciprocity calibration of the **vector receiver**. For each measurement configuration, the transducer pair shall be deployed in water separated by a known distance with their axes aligned towards each other.

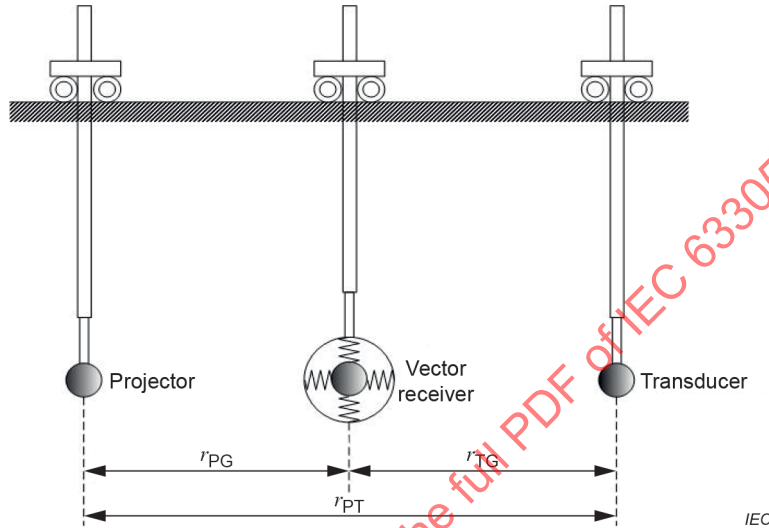


Figure 3 – Measurement framework for free-field reciprocity calibration of the vector receiver

For all configurations, the requirements for acoustic free-field conditions, far-field conditions and steady-state conditions shall be met. The electrical transfer impedance of each transducer pair shall be determined at the desired number of frequencies throughout the frequency range of interest.

Let a current signal $I_P(t)$ flow through a projector P with a transmitting response to current, $\underline{S}_{I,P}$. At a distance r_{PG} from its reference centre and in the reference direction specified in the definition of $\underline{S}_{I,P}$, the **vector receiver** outputs a voltage signal $U_{PG}(t)$, and the electrical transfer impedance of this transducer pair in the spherical wave sound field is given by:

$$\underline{Z}_{PG} = \frac{\mathcal{F}(U_{PG}(t))}{\mathcal{F}(I_P(t))} = \left(1 + \frac{1}{jk r_{PG}}\right) \frac{-jk \underline{S}_{I,P} \underline{M}_{pg}}{r_{PG}} e^{jk(r_{PG} - r_0)} \quad (15)$$

where j is square root of minus one, k is acoustic wavenumber, $\underline{M}_{pg}$ is **sound pressure gradient sensitivity** of the **vector receiver**, and r_0 is equal to one metre.

Then, place **vector receiver** G in another sound field produced by a reciprocal transducer T, the reference centre of **vector receiver** G is at a distance r_{TG} from the reference centre of the reciprocal transducer T. Let a current signal $I_T(t)$ flow through the reciprocal transducer T with a transmitting response to current, $\underline{S}_{I,T}$. The **vector receiver** outputs a voltage signal $U_{TG}(t)$, and the electrical transfer impedance of this transducer pair in the spherical wave sound field is given by:

$$\underline{Z}_{TG} = \frac{\mathcal{F}(U_{TG}(t))}{\mathcal{F}(I_T(t))} = \left(1 + \frac{1}{jkr_{TG}}\right) \frac{-jk\underline{S}_{I,T}\underline{M}_{pg}}{r_{TG}} e^{jk(r_{TG}-r_0)} \quad (16)$$

In the end, place the reciprocal transducer T in a sound field which is produced by the projector P, so that the reference centre of reciprocal transducer T is at a distance r_{PT} from the reference centre of the projector P. Let a current $I_P(t)$ flow through the projector P with a transmitting response to current, $\underline{S}_{I,P}$. The reciprocal transducer outputs a voltage signal $U_{PT}(t)$, and the electrical transfer impedance of this transducer pair is given by:

$$\underline{Z}_{PT} = \frac{\mathcal{F}(U_{PT}(t))}{\mathcal{F}(I_P(t))} = \frac{\underline{S}_{I,P}\underline{M}_T}{r_{PT}} e^{jk(r_{PT}-r_0)} \quad (17)$$

For a reciprocal transducer, the quotient of the free field sensitivity and the transmitting response to current is equal to the spherical wave reciprocity parameter $2r_0 / \rho f$ at the reference distance of $r_0 = 1$ m:

$$\frac{\underline{M}_T}{\underline{S}_{I,T}} = \frac{2}{j\rho f} e^{jk r_0} \quad (18)$$

At each acoustic frequency, the modulus alone of free-field **sound pressure gradient sensitivity** $\underline{M}_{pg}$ of the **vector receiver** can be determined from Formula (15) to Formula (18) as follows:

$$|\underline{M}_{pg}| = \sqrt{\frac{2}{\rho f} \frac{|\underline{Z}_{TG}| |\underline{Z}_{PG}| r_{PG} r_{TG}}{|\underline{Z}_{PT}| r_{PT}}} \sqrt{\frac{r_{PG} r_{TG}}{\sqrt{k^2 r_{TG}^2 + 1} \sqrt{k^2 r_{PG}^2 + 1}}} \quad (19)$$

The phase alone of free-field **sound pressure gradient sensitivity** $\underline{M}_{pg}$ is as follows:

$$\arg(\underline{M}_{pg}) = \frac{1}{2} [\phi_{TG} + \phi_{PG} - \phi_{PT} + k(r_{TG} + r_{PG} - r_{PT}) - \frac{\pi}{2} - \arctan(kr_{PG}) - \arctan(kr_{TG})] \quad (20)$$

where ϕ_{PG} is the phase angle of electrical transfer impedance $\underline{Z}_{PG}$, ϕ_{TG} is the phase angle of electrical transfer impedance $\underline{Z}_{TG}$ and ϕ_{PT} is the phase angle of electrical transfer impedance $\underline{Z}_{PT}$.

NOTE The measurement error of the distances has a great influence on calibration of the phase angle of sensitivity. If the transducers can be aligned as shown in Figure 3, then the distances between transducers have a relationship of $r_{PG} + r_{TG} = r_{PT}$, and the measurement error of the phase angle can be reduced, and Formula (20) can be simplified as follows:

$$\arg\left(\frac{M_{pg}}{M_{pg}}\right) = \frac{1}{2}[\phi_{TG} + \phi_{PG} - \phi_{PT} - \frac{\pi}{2} - \arctan(kr_{PG}) - \arctan(kr_{TG})]$$

The **sound pressure gradient sensitivity level** can be calculated from Formula (10). Other sensitivities can be calculated from Formula (13), and their sensitivity levels can be calculated referring to the definitions in Clause 3.

9.1.3 Measurement

The projector, **vector receiver** and reciprocal transducer should be aligned in water as in Figure 3. The method of alignment of transducers and the method of suspension of the **vector receiver** are specified in 6.5.3.

The projector, **vector receiver** and reciprocal transducer shall be immersed in the centre of the water tank to eliminate the reflected sound wave from the boundary and water surface.

The transfer impedance of transducers pair shall be measured and the sensitivity of **vector receiver** shall be calculated as specified in 9.1.2.

NOTE The receiving channel of **vector receiver** has a strong directivity. During calibration, the **vector receiver** channel to be calibrated is aimed at the principal axis of the projector.

9.1.4 Uncertainty

The overall uncertainty for the calibration shall be determined and expressed with the value for the sensitivity. The overall expanded uncertainty (95 % confidence levels) of the calibration can be less than 0,7 dB with careful practice.

9.2 Free-field calibration using optical interferometry

9.2.1 General

An absolute calibration method based on optical interferometry in free-field for **vector receivers** is described. The optical interferometer is used for measurement of the **sound particle velocity** at the reference centre of the **vector receiver** channel to be calibrated. The method can be used in the frequency range 2 kHz to 10 kHz depending on the size of the test tank. It is an absolute calibration method for the **sound particle velocity sensitivity** of the receiving channel of **vector receivers** [21], [22], [23].

9.2.2 Principle

Figure 4 shows the schematic diagram of free-field calibration for **vector receiver** using an optical interferometer. A projector excited by tone burst signals is deployed in water, which creates a steady wave sound field in the water tank. An optically reflective and acoustically transparent suspended pellicle is deployed in the far field of the projector. The velocity of the pellicle is measured by an optical interferometer. The **vector receiver** suspended on a mounting ring is then substituted for the pellicle. The output voltage of the **vector receiver** channel to be calibrated is then measured, and the **sound particle velocity sensitivity** of the **vector receiver** channel can be calculated.

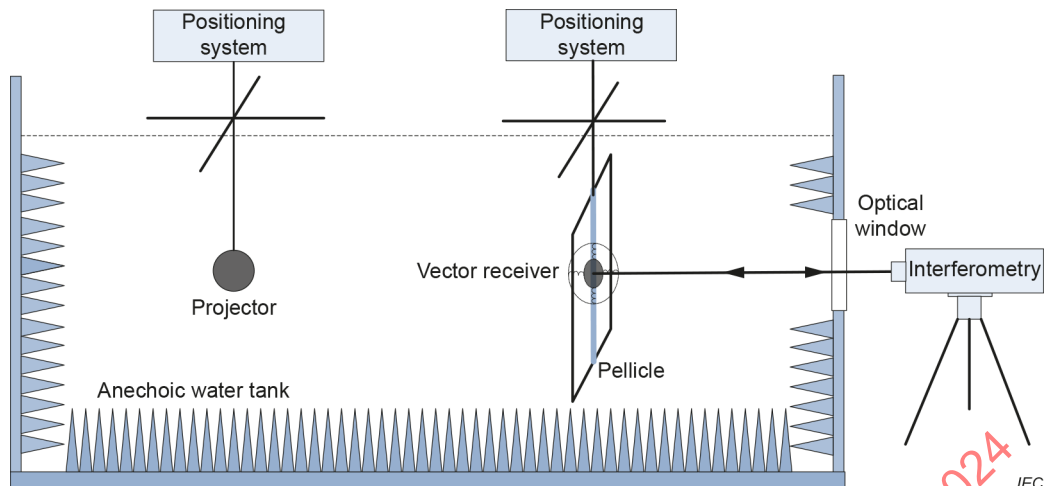


Figure 4 – Schematic diagram of free-field calibration for vector receiver using an optical interferometer

In the free-field, the **sound particle velocity** u at the reference centre of the **vector receiver** channel to be calibrated is expressed as follows:

$$|u| = \frac{K_i \cdot |\mathcal{F}(U_O(t))|}{|\underline{n}^*|} \quad (21)$$

where K_i is the sensitivity coefficient of the optical interferometer, $U_O(t)$ is the output voltage signal of the optical interferometer, and $\underline{n}^*$ is the effective refractive index which reflects the acousto-optic effect in the sound field.

The output voltage signal of the **vector receiver** channel $U_{VR}(t)$ is measured. According to Formula (5), the **sound particle velocity sensitivity** of the **vector receiver** channel to be calibrated is as follows:

$$\underline{M}_u = \frac{\mathcal{F}(U_{VR}(t)) \cdot \underline{n}^*}{K_i \cdot \mathcal{F}(U_O(t))} \quad (22)$$

The **sound particle velocity sensitivity level** can be calculated from Formula (6). Other sensitivities can be calculated from Formula (13), and their sensitivity levels can be calculated according to the definitions in Clause 3.

9.2.3 Measurement

The laser beam from the optical interferometer penetrates the medium and is incident on the pellicle, and reflected back to the optical interferometer. The thickness of the pellicle shall be much less than the wavelength of the sound wave, and the velocity measured by optical interferometer is then equal to the **sound particle velocity** in water.

The **vector receiver** is suspended on the mounting ring as specified in 6.5.3 and deployed in the water tank, with its reference centre coincident with the measurement point on the pellicle.

The output voltage of the optical interferometer and the **vector receiver** channel to be calibrated shall be measured, and the **sound particle velocity sensitivity** of the **vector receiver** channel shall be calculated as specified in 9.2.2.

NOTE To avoid the influence of the reflection sound wave coming from the surface and boundary of the water tank with limited size, the transducers and the pellicle are deployed in the middle region of the water tank.

9.2.4 Uncertainty

The overall uncertainty for the free-field calibration using optical interferometry shall be determined and expressed with the value for the sensitivity. The overall sensitivity uncertainty (95 % confidence levels) of the calibration can be less than 0,7 dB with careful practice.

9.3 Free-field calibration using a reference hydrophone

9.3.1 General

This method describes a comparison calibration using reference **hydrophone** in free-field conditions for **vector receivers**. Calibration of a **vector receiver** channel by comparison method requires a calibrated reference **hydrophone** and an auxiliary projector. The method can be used in the frequency range 250 Hz to 10 kHz in a laboratory water tank [24], [25].

9.3.2 Principle

Figure 5 shows the schematic diagram of free-field comparison calibration for **vector receiver** using reference **hydrophone**. The projector P excited by tone burst signals is deployed in water, which creates a steady wave sound field in the water tank. A **vector receiver** G and a reference **hydrophone** R in the far field of projector P are deployed at the same depth with projector P, and the three transducers are aligned underwater.

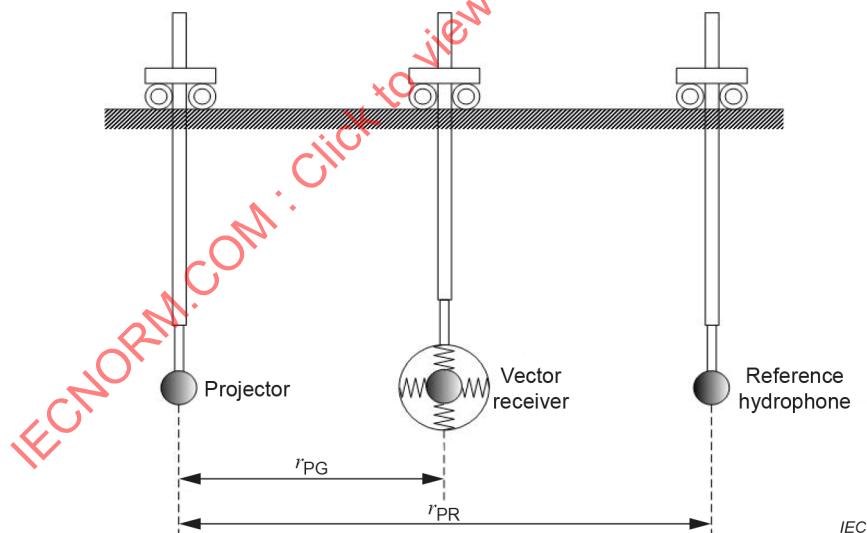


Figure 5 – Schematic diagram of free-field comparison calibration for vector receiver using reference hydrophone

The output voltage signal $U_{VR}(t)$ of the **vector receiver** channel to be calibrated and open-circuit voltage signal $U_0(t)$ of the reference **hydrophone** are then measured, and **sound particle velocity sensitivity** of the **vector receiver** channel in the spherical wave sound field can be calculated as follows:

$$\underline{M}_u = \rho c \underline{M}_0 \frac{\mathcal{F}(U_{VR}(t))}{\mathcal{F}(U_0(t))} \cdot \frac{r_{PG}}{r_{PR} \left(1 + \frac{1}{jkr_{PR}}\right)} \quad (23)$$

where r_{PG} is the distance between the reference centre of the projector P and the reference centre of the **vector receiver** G, r_{PR} is the distance between the reference centre of the projector P and the reference centre of the reference **hydrophone** R, $\underline{M}_0$ is the sensitivity of the calibrated reference **hydrophone**, ρ is the density of water, c is the sound velocity in water.

The **sound particle acceleration sensitivity**, **sound particle displacement sensitivity** and **sound pressure gradient sensitivity** can be calculated from Formula (13), and their sensitivity levels can be calculated according to the definitions in Clause 3.

9.3.3 Measurement

The **vector receiver** is suspended on the mounting ring as specified in 6.5.3, and the projector, **vector receiver** and reference **hydrophone** are recommended to be aligned in free-field conditions as shown in Figure 5. Then, the distances between the reference centres of the projector and the **vector receiver**, the projector and the reference **hydrophone** are measured.

The output voltage of the **vector receiver** channel to be calibrated and open-circuit voltage of the reference **hydrophone** shall be measured, and the sensitivity of the **vector receiver** shall be calculated as specified in 9.3.2.

NOTE The reference **hydrophone** is calibrated by absolute calibration method such as free-field reciprocity method with low measurement uncertainty.

9.3.4 Uncertainty

The overall uncertainty for the free-field calibration using a reference **hydrophone** shall be determined and expressed with the value for the sensitivity. The overall sensitivity expanded uncertainty (95 % confidence levels) can be less than 1,5 dB with careful practice.

10 Calibration in standing wave tube

10.1 Calibration using reference accelerometer

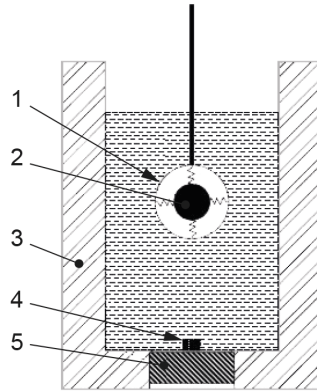
10.1.1 General

This method describes a comparison calibration using a reference accelerometer for **vector receivers**. The reference accelerometer is used for measurement of the acceleration on the surface of a projector at the bottom of the tube chamber, and the acceleration at reference centre of the **vector receiver** can be calculated. The method can be used in the frequency range 5 Hz to (at least) 400 Hz in a vertical standing wave tube. It is a relative calibration method for **sound particle acceleration sensitivity** calibration of the receiving channel of **vector receivers** [26], [27], [28], [29].

10.1.2 Principle

Figure 6 shows the schematic diagram of the vertical standing wave tube calibration using a reference accelerometer for **vector receivers**. The tube chamber is filled with water, and a projector is deployed at the bottom of the chamber and vibrates sinusoidally to create a standing sound wave field in the tube. A **vector receiver** suspended on a mounting ring is immersed underwater at the depth of h .

In the standing wave tube, the acoustic wavelength is larger than the length of the liquid column, and the acceleration at the reference centre of the **vector receiver** can be calculated from measurement of the acceleration on the surface of the projector at the bottom of the tube chamber. When the output voltage of the **vector receiver** channel to be calibrated is measured, the **sound particle acceleration sensitivity** of the **vector receiver** channel can be calculated from Formula (7).



IEC

Key

- 1 mounting ring
- 2 **vector receiver**
- 3 chamber
- 4 reference accelerometer
- 5 projector

Figure 6 – Schematic diagram of vertical standing wave tube calibration using reference accelerometer

In the chamber, the modulus of the **sound particle acceleration** at the reference centre of the **vector receiver** channel to be calibrated is expressed as follows:

$$|a_h| = |a_0| \frac{S_1 \cos(kh)}{S_2 \cos(kl)} \quad (24)$$

where $|a_0|$ is the modulus of acceleration on the surface of the projector, $|a_h|$ is the modulus of acceleration at the reference centre of the **vector receiver** channel, projector S_1 is the area of the projector, S_2 is the internal cross-sectional area of the chamber, l is the length of the liquid column in the standing wave tube.

The voltage signal output by reference accelerometer is $e_a(t)$, and its sensitivity is s_{ea} . The acceleration can then be calculated by:

$$|a_0| = \frac{|\mathcal{F}(e_a(t))|}{s_{ea}} \quad (25)$$

The output voltage signal of the **vector receiver** channel $U_{VR}(t)$ is measured. According to Formula (7), the modulus of the **sound particle acceleration sensitivity** of the **vector receiver** channel to be calibrated is as follows:

$$|\underline{M}_a| = \frac{S_2 \cos(kl)}{S_1 \cos(kh)} \frac{s_{ea}}{|\mathcal{F}(e_a(t))|} |\mathcal{F}(U_{VR}(t))| \quad (26)$$

The **sound particle acceleration sensitivity level** can be calculated from Formula (8). Other sensitivities can be calculated from Formula (13), and their sensitivity levels can be calculated according to the definitions in Clause 3.

10.1.3 Measurement

The calibrated reference accelerometer is rigidly fixed on the surface of projector at the bottom of the tube chamber, so that it is co-vibrating with the projector.

NOTE The reference accelerometer has no influence on the vibration of the projector.

The **vector receiver** is suspended on the mounting ring as specified in 6.5.3 and deployed at the immersed depth in water of the tube chamber, and the immersed depth shall be measured.

The output voltage of the reference accelerometer and the **vector receiver** channel to be calibrated shall be measured, and the **sound particle acceleration sensitivity** of the **vector receiver** channel shall be calculated as specified in 10.1.2.

10.1.4 Uncertainty

The overall uncertainty for the standing wave tube calibration using a reference accelerometer shall be determined and expressed with the value for the sensitivity. The overall sensitivity uncertainty (95 % confidence levels) of the calibration can be less than 1,0 dB with careful practice.

10.2 Comparison calibration using reference hydrophone in standing wave tube

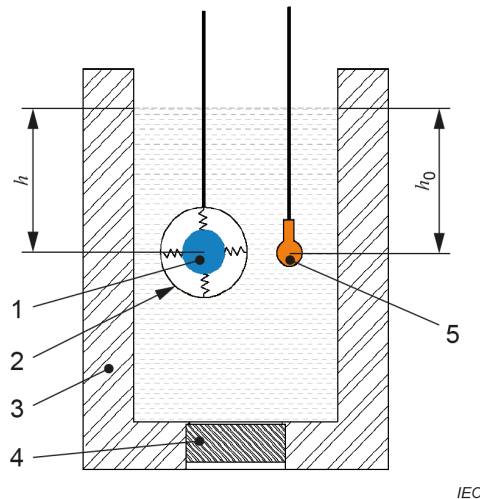
10.2.1 General

This method describes a comparison calibration using reference **hydrophone** in standing wave tube for **vector receivers**. A calibrated reference **hydrophone** is used for measurement of the sound pressure at the reference centre of the **vector receiver** to be calibrated. The method can be used in the frequency range 5 Hz to 2 kHz in a vertical standing wave tube [8], [30], [31], [32].

10.2.2 Principle

Figure 7 shows the schematic diagram of the vertical standing wave tube calibration using reference **hydrophone** for **vector receivers**. The tube chamber is filled with water, and a projector is deployed at the bottom of the chamber and vibrates sinusoidally to create a standing sound wave field in the tube. A **vector receiver** suspended on a mounting ring is deployed at the immersed depth h .

The reference **hydrophone** is deployed at the immersed depth of h_0 . In the standing wave tube, the sound wavelength is larger than the length of the liquid column, and the sound pressure at the reference centre of the **vector receiver** can be calculated by measurement of the sound pressure of the reference **hydrophone**.



Key

- 1 **vector receiver**
- 2 mounting ring
- 3 chamber
- 4 projector
- 5 reference **hydrophone**

Figure 7 – Schematic diagram of vertical standing wave tube calibration using reference hydrophone

The output voltage signal of the reference **hydrophone** is $U_0(t)$, and the modulus of the sound pressure at the reference centre of the acoustic wave vector channel to be calibrated is expressed as follows:

$$|p_h| = \frac{\cos(kh)}{\sin(kh_0)} \frac{|\mathcal{F}(U_0(t))|}{|\underline{M}_0|} \quad (27)$$

where k is the acoustic wavenumber, and $\underline{M}_0$ is the sensitivity of the calibrated reference **hydrophone**.

The **sound pressure gradient** at the reference centre of the acoustic wave vector channel can be expressed as follows:

$$|\nabla p_h| = k \frac{\sin(kh)}{\sin(kh_0)} \frac{|\mathcal{F}(U_0(t))|}{|\underline{M}_0|} \quad (28)$$

The output voltage signal of the **vector receiver** channel $U_{VR}(t)$ is measured. The modulus of the **sound pressure gradient sensitivity** of the **vector receiver** channel to be calibrated is as follows:

$$|\underline{M}_{pg}| = \frac{|\mathcal{F}(U_{VR}(t))| \sin(kh_0)}{|\mathcal{F}(U_0(t))| k \sin(kh)} |\underline{M}_0| \quad (29)$$

The **sound particle velocity sensitivity**, **sound particle acceleration sensitivity** and **sound particle displacement sensitivity** can be calculated from Formula (13), and their sensitivity levels can be calculated according to the definitions in Clause 3.

10.2.3 Measurement

The **vector receiver** is suspended on the mounting ring as specified in 6.5.3. The **vector receiver** and reference **hydrophone** are deployed at the appropriate depth in the tube chamber, and the immersed depth shall be measured.

The output voltage of the **vector receiver** channel to be calibrated and the open-circuit voltage of the reference **hydrophone** shall be measured, and the sensitivity of the **vector receiver** channel shall be calculated as specified in 10.2.2.

NOTE The reference **hydrophone** is calibrated by an absolute calibration method such as acoustic coupler method, vibrating column method, etc. with low measurement uncertainty.

10.2.4 Uncertainty

The overall uncertainty for the standing wave tube calibration using reference **hydrophone** shall be determined and expressed with the value for the sensitivity. The overall sensitivity uncertainty (95 % confidence levels) can be less than 1,5 dB with careful practice.

10.3 Horizontal standing wave tube calibration

10.3.1 General

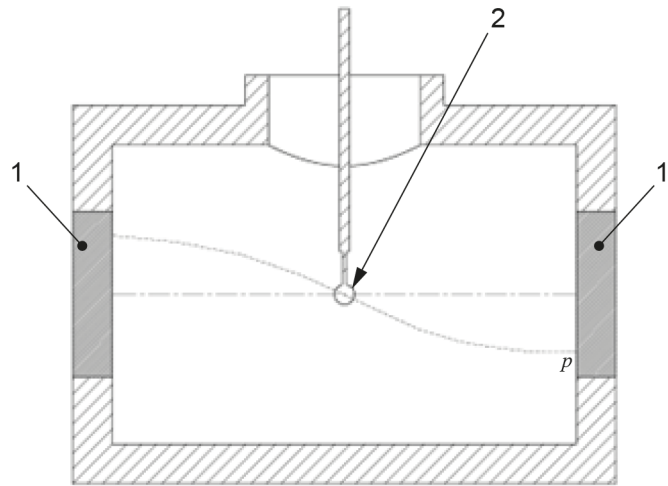
This method describes a horizontal standing wave tube calibration for **vector receivers**. Two reference **hydrophones** are used for measurement of the **sound pressure gradient** at the reference centre of the **vector receiver** to be calibrated. The method can be used in the frequency range 20 Hz to 2 kHz in a horizontal standing wave tube. It is a calibration method for **sound pressure gradient sensitivity** calibration of the receiving channel of **vector receivers** [1], [33], [34].

10.3.2 Principle

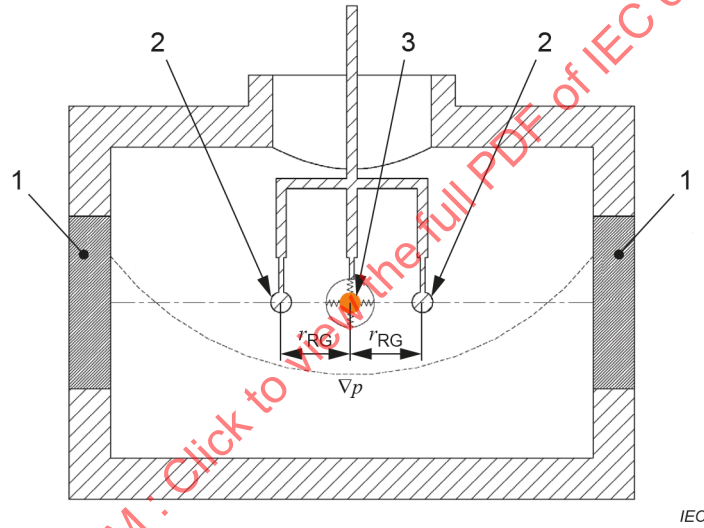
Figure 8 shows the schematic diagram of the horizontal standing wave tube calibration for **vector receivers**. The tube chamber filled with water is placed horizontally with two projectors installed at the central region of both ends and an upper hole open for deployment of the **vector receiver** to be calibrated and two reference **hydrophones**.

One projector is excited by continuous wave signals vibrating sinusoidally to create a standing wave sound field in the water. Another projector is also excited with the signals of the same frequency, and the amplitude and phase of the continuous signals are adjusted until the output voltage of a **hydrophone** at the central point of the tube chamber is close to zero. A reference **hydrophone** is placed in the centre of the tube, which is shown in Figure 8 a), to measure the sound pressure. When the output voltage of the **hydrophone** is close to zero, the **sound pressure gradient** at that point shall be the maximum, which is shown in Figure 8 b).

When the output voltage of the **vector receiver** channel to be calibrated and the **sound pressure gradient** of the two **hydrophones** pair are measured, the **sound pressure gradient sensitivity** of the **vector receiver** channel can be calculated.



a) sound pressure measured by reference hydrophone



b) sound pressure gradient measured by two reference hydrophones and vector receiver

Key

- 1 projector
- 2 reference hydrophones
- 3 vector receiver

Figure 8 – Schematic diagram of calibration principle and horizontal standing wave tube calibration

The open-circuit voltage signals of the two reference **hydrophone** pairs $U_1(t)$ and $U_2(t)$ are measured, and the **sound pressure gradient** at the reference centre of the acoustic wave vector channel to be calibrated is expressed as follows:

$$\nabla p = \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\frac{\mathcal{F}(U_1(t))}{|M_1|} - \frac{\mathcal{F}(U_2(t))}{|M_2|}}{\Delta r} \cdot \frac{kr_{RG}}{\sin(kr_{RG})} = \frac{k(|M_2|\mathcal{F}(U_1(t)) - |M_1|\mathcal{F}(U_2(t)))}{2|M_1||M_2|\sin(kr_{RG})} \quad (30)$$

where $\Delta r = 2r_{RG}$ is the distance between two reference **hydrophones**, k is the acoustic wavenumber, $\underline{M}_1$ and $\underline{M}_2$ are the sensitivity of the calibrated reference **hydrophones**.

The output voltage signal of the **vector receiver** channel $U_{VR}(t)$ is measured. The modulus of the sound pressure sensitivity of the **vector receiver** channel to be calibrated is as follows:

$$|\underline{M}_{pg}| = \frac{2|\mathcal{F}(U_{VR}(t))||\underline{M}_1||\underline{M}_2|\sin(kr_{RG})}{k(|\underline{M}_2|\mathcal{F}(U_1(t)) - |\underline{M}_1|\mathcal{F}(U_2(t)))} \quad (31)$$

The **sound pressure gradient sensitivity level** can be calculated from Formula (10). Other sensitivities can be calculated from Formula (13), and their sensitivity levels can be calculated according to the definitions in Clause 3.

10.3.3 Measurement

The **vector receiver** is suspended on the mounting ring as specified in 6.5.3, which is deployed in the horizontal standing wave tube with the reference centre on the central point of the tube chamber, and the principal axis of the **vector receiver** channel to be calibrated to be coincident with the axial of two projectors.

The reference **hydrophones** are deployed on both sides of the **vector receiver**, both at the same distance from the **vector receiver** and with their reference centre on the axial of two projectors. The distance between the **vector receiver** and reference **hydrophone** shall be measured.

The output voltage of the **vector receiver** channel to be calibrated and the open-circuit voltage of the reference **hydrophone** pair shall be measured, and the sensitivity of the **vector receiver** channel shall be calculated as specified in 10.3.2.

10.3.4 Uncertainty

The overall uncertainty for the horizontal standing wave tube calibration shall be determined and expressed with the value for the sensitivity. The overall sensitivity uncertainty (95 % confidence levels) can be less than 1,5 dB with careful practice.

10.4 Calibration using optical interferometry in standing wave tube

10.4.1 General

This method describes an absolute calibration in vertical standing wave tube for **vector receivers** based on optical interferometry. An optical interferometer is used for measurement of the **sound particle velocity** on the interface of water and air. The method can be used in the frequency range 20 Hz to 2 kHz. It is an absolute calibration method for the **sound particle velocity sensitivity** of the receiving channel of **vector receivers** [23].

10.4.2 Principle

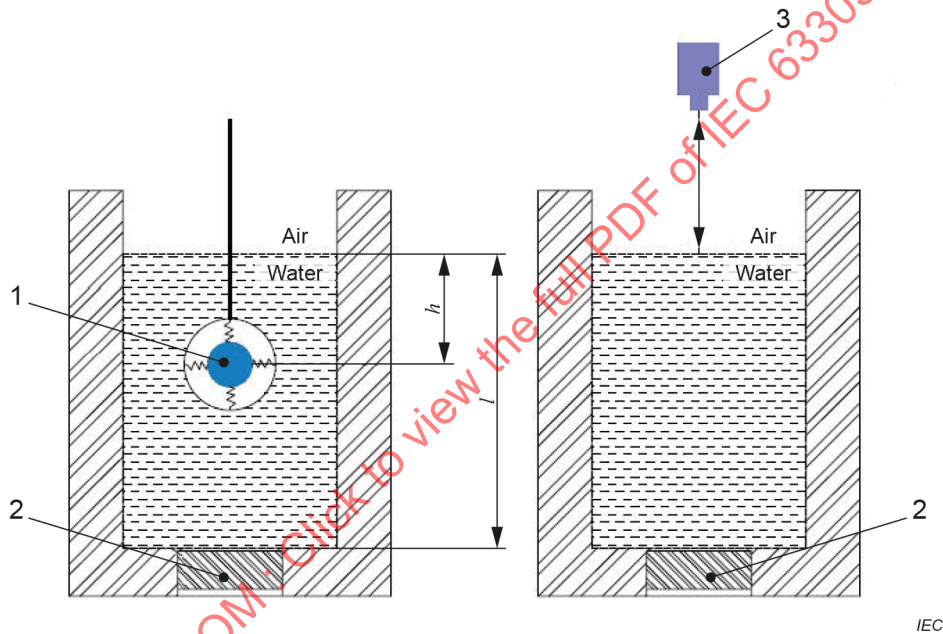
Figure 9 shows the schematic diagram of the vertical standing wave tube calibration using optical interferometry for **vector receivers**. The vertical tube chamber is filled with water, and a projector is deployed at the bottom of the chamber and vibrates sinusoidally to create a standing wave sound field in the tube. A **vector receiver** suspended on a mounting ring is immersed underwater at the depth of h and co-vibrates with the **sound particle** in water.

The output voltage of the **vector receiver** channel to be calibrated is then measured, and the **sound particle velocity sensitivity** of the **vector receiver** channel can be calculated from Formula (5).

In the chamber, the modulus of the **sound particle velocity** at the reference centre of the acoustic wave vector channel to be calibrated is expressed as follows:

$$|\underline{u}_h| = |\underline{u}_0| \cos(kh) \quad (32)$$

where $\underline{u}_0$ is the **sound particle velocity** on the interface of the water and air measured by optical interferometer, $\underline{u}_h$ is the modulus of velocity at the reference centre of the **vector receiver** channel, and k is the acoustic wavenumber.



Key

- 1 **vector receiver**
- 2 projector
- 3 optical interferometer

Figure 9 – Schematic diagram of calibration for vector receiver using optical interferometer in standing wave tube

The voltage signal output by optical interferometer is $U_O(t)$, and its sensitivity coefficient is K_i . The modulus of the **sound particle velocity** can then be calculated by:

$$|\underline{u}_0| = K_i \cdot |\mathcal{F}(U_O(t))| \quad (33)$$

The output voltage signal of the **vector receiver** channel $U_{VR}(t)$ is measured. According to Formulas (5), (32) and (33), the modulus of the **sound particle velocity sensitivity** of the **vector receiver** channel to be calibrated is as follows:

$$|\underline{M}_u| = \frac{|\mathcal{F}(U_{VR}(t))|}{K_i \cos(kh) |\mathcal{F}(U_O(t))|} \quad (34)$$

The **sound particle velocity sensitivity level** can be calculated from Formula (6). Other sensitivities can be calculated from Formula (13), and their sensitivity levels can be calculated according to the definitions in Clause 3.

10.4.3 Measurement

The **vector receiver** is suspended on the mounting ring as specified in 6.5.3 and deployed at the immersed depth in water of the tube chamber, and the immersed depth shall be accurately measured.

The laser beam from the optical interferometer which is used for measurement of the **sound particle velocity** on the interface of water and air is vertically incident to the central region of the interface, and reflected back to the optical interferometer.

The output voltage of the optical interferometer and the **vector receiver** channel to be calibrated shall be measured, and the **sound particle velocity sensitivity** of the **vector receiver** channel shall be calculated as specified in 10.4.2.

NOTE The electrical voltage excited to the projector at the bottom of the tube chamber can not be too large, or else the output voltage of the optical interferometer will be overloaded. In addition, the fluctuating water surface of the standing wave tube will affect the return of the laser beam.

10.4.4 Uncertainty

The overall uncertainty for the standing wave tube calibration using optical interferometry shall be determined and expressed with the value for the sensitivity. The overall sensitivity uncertainty (95 % confidence levels) of the calibration can be less than 1,0 dB with careful practice.

11 Calibration in a travelling wave tube

11.1 General

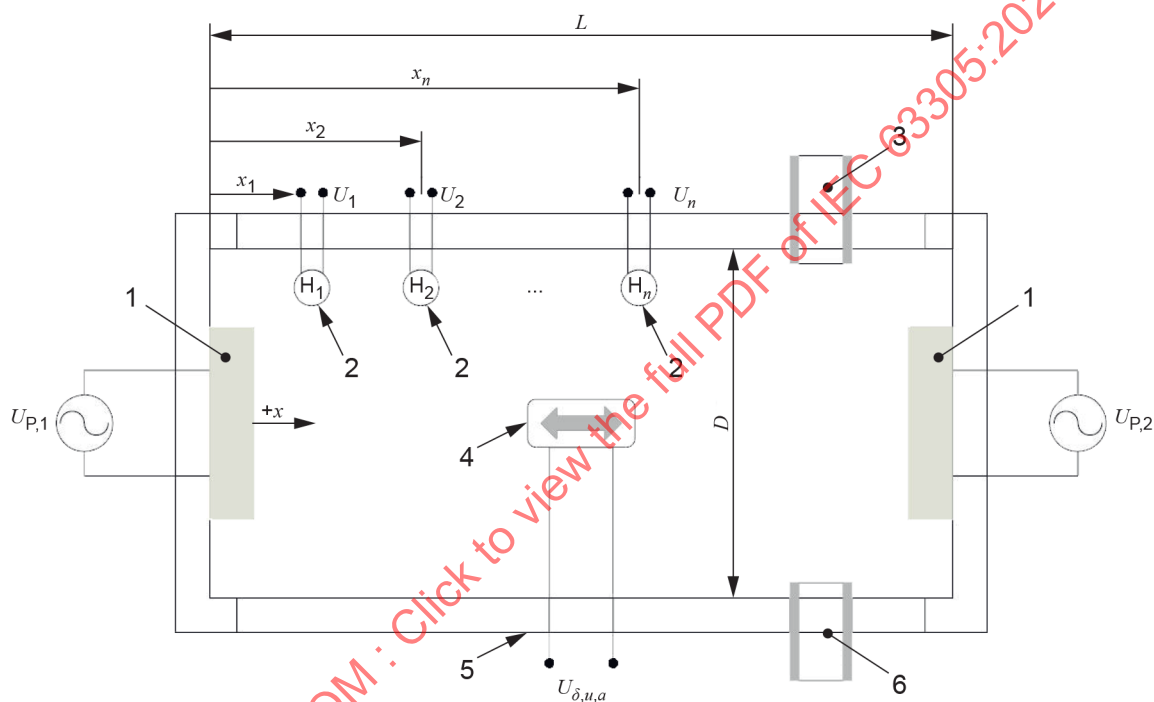
This method describes a travelling wave tube calibration for **vector receivers**. The calibration is carried out in a rigid-walled, fluid-filled **acoustic waveguide**, or travelling wave tube, inside of which exists a unidirectional, plane progressive wave field. The method can be used in the frequency range 5 Hz to 2 kHz in a travelling wave tube [35], [36].

NOTE Among the advantages of **vector receiver** calibrations performed in a travelling wave tube is that the temperature and hydrostatic pressure inside the fluid-filled **acoustic waveguide** can be controlled to simulate ambient conditions of oceanic environment [37].

11.2 Principle

11.2.1 General

Figure 10 shows the schematic diagram of travelling wave tube method for **vector receiver**. The measurement system consists of a rigid-walled tube terminated at both ends by an acoustic projector (or array thereof). The diameter and length of the fluid-filled **acoustic waveguide** are D and L , respectively. x is the distance along the longitudinal axis of the **acoustic waveguide**. Also shown in the figure is an array of reference **hydrophones** arranged along the sidewall and used to observe the acoustic wave field. x_n is the distance along the longitudinal axis of the n th reference **hydrophone**. A **vector receiver** is shown located on the longitudinal axis of the **acoustic waveguide**. The response of the **vector receiver** is (nominally) independent of frequency and linear in any of the acoustic vector field parameters including **sound particle displacement**, **sound particle velocity** and **sound particle acceleration**.



IEC

Key

- 1 projector
- 2 reference **hydrophones**
- 3 waveguide fill
- 4 **vector receiver**
- 5 rigid-walled circular tube
- 6 waveguide drain

Figure 10 – Schematic diagram of calibration for vector receiver in a travelling wave tube

The travelling wave tube uses a projector at one end of the tube to transmit an acoustic signal and a second projector at the opposite end to provide an active load impedance, which together control the acoustic field inside the **acoustic waveguide**. A number $n > 1$ of reference **hydrophones** arranged in a line along a side wall provide measurements of the acoustic field inside the **acoustic waveguide**. Data provided by the **hydrophones** are used to determine the time harmonic voltage signals supplied to the projectors to establish unidirectional, plane progressive waves inside the **acoustic waveguide** [38], [39], [40], [41].

11.2.2 Establishment of a unidirectional, plane progressive wave field

11.2.2.1 Acoustic field in a travelling wave tube

A one-dimensional acoustic wave field exists when the acoustic wavelength λ is much greater than the diameter of the **acoustic waveguide**, such that $kD/2 \ll 1$, where k is the acoustic wavenumber and D is the **acoustic waveguide** diameter. When this constraint is satisfied, the acoustic pressure p inside the **acoustic waveguide** is the real part of the superposition of a one-dimensional travelling wave propagating in the positive x -direction and a second one-dimensional wave propagating in the negative x -direction as shown in Formula (35):

$$\underline{p}(t, x) = \Re \left(A e^{j(\omega t - kx)} + B e^{j(\omega t + kx)} \right) \quad (35)$$

where A and B are the amplitudes of the two waves, ω is radian frequency and t is time.

The objective when establishing a plane progressive wave is for one of the travelling wave components to take on a desired value (i.e. $A = P_0$, where P_0 is the desired sound pressure) and for the other to vanish (i.e. $B = 0$).

The transfer matrix equation for the acoustic field inside the **acoustic waveguide** is

$$\underline{\mathbf{S}} \underline{\mathbf{U}}_{\mathbf{P}} = \underline{\mathbf{p}} \quad (36)$$

which is expanded in Formula (37) as

$$\begin{bmatrix} \underline{S}_{11} & \underline{S}_{12} \\ \underline{S}_{21} & \underline{S}_{22} \\ \vdots & \vdots \\ \underline{S}_{n1} & \underline{S}_{n2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{F}(U_{\mathbf{P},1}(t)) \\ \mathcal{F}(U_{\mathbf{P},2}(t)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{F}(p_1(t)) \\ \mathcal{F}(p_2(t)) \\ \vdots \\ \mathcal{F}(p_n(t)) \end{bmatrix} \quad (37)$$

where $\underline{S}_{ij}$ are the (initially unknown) complex coefficients of the transfer matrix $\underline{\mathbf{S}}$, the matrix $\underline{\mathbf{p}}$ contains the Fourier transforms of the acoustic pressure p_i observed by the reference **hydrophones** dispersed along the length of the **acoustic waveguide**, and the vector $\underline{\mathbf{U}}_{\mathbf{P}}$ represents the Fourier transforms of the time-harmonic drive voltages $U_{\mathbf{P},j}$; $j = 1, 2$ supplied to the acoustic projectors.

The complex acoustic pressure amplitudes in the **acoustic waveguide** are determined as

$$\mathcal{F}(p_i(t)) = \frac{\mathcal{F}(U_i(t))}{\underline{M}_{0,i}}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (38)$$

where the voltage signal $U_i(t)$ is observed by the i th reference **hydrophone** with complex sensitivity $\underline{M}_{0,i}$.

11.2.2.2 Determination of the complex acoustic transfer matrix

Establishment of a plane progressive wave requires measurements to compute the matrix $\underline{S}$ representing the set of complex transfer functions between the two acoustic projectors and the **hydrophone** locations x_i that are distributed along the length L of the **acoustic waveguide**. The coefficients $\underline{S}_{ij}$ of the complex transfer matrix $\underline{S}$ are dimensioned as pascal per volt ($\text{Pa}\cdot\text{V}^{-1}$).

The first measurement is performed by supplying acoustic projector 1 with the time-harmonic voltage signal $U_{P,1}(t)$ while the input of acoustic projector 2 is short circuited. The Fourier transforms of the acoustic pressure $p_i(t)$ in the **acoustic waveguide** are then measured by the reference **hydrophones**. Evaluation of Formula (39) yields the $\underline{S}_{i1}$ terms in the transfer matrix (i.e. the first column).

$$\underline{S}_{i1} = \frac{\mathcal{F}(p_i(t))}{\mathcal{F}(U_{P,1}(t))}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (39)$$

The second measurement is performed by supplying acoustic projector 2 with the time harmonic, drive voltage signal $U_{P,2}(t)$ while the input of acoustic projector 1 is short circuited (i.e., $U_{P,1}(t) = 0$) and again observing the Fourier transforms of the acoustic pressure p_i in the **acoustic waveguide**. Evaluation of Formula (40) yields the $\underline{S}_{i2}$ terms of the second column of the complex transfer matrix $\underline{S}$.

$$\underline{S}_{i2} = \frac{\mathcal{F}(p_i(t))}{\mathcal{F}(U_{P,2}(t))}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (40)$$

Once the transfer matrix $\underline{S}$ is known, the time harmonic, projector drive voltage signals can generate a unidirectional, plane progressive wave in the positive x -direction. They are computed as the product of the pseudo-inverse of the matrix $\underline{S}$ and the vector $\underline{p}$ for an ideal plane progressive wave $\mathcal{F}(p(t)) = P_0 e^{-jkx}$.

$$\begin{bmatrix} \mathcal{F}(U_{P,1}(t)) \\ \mathcal{F}(U_{P,2}(t)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{S}_{11} & \underline{S}_{12} \\ \underline{S}_{21} & \underline{S}_{22} \\ \vdots & \vdots \\ \underline{S}_{n1} & \underline{S}_{n2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} e^{-jkx_1} \\ e^{-jkx_2} \\ \vdots \\ e^{-jkx_n} \end{bmatrix} P_0 \quad (41)$$

where P_0 is the magnitude of the desired acoustic field pressure, and x_i is the axial displacement of the i th reference **hydrophone**. The result is a plane progressive wave travelling in the positive x -direction with magnitude P_0 and no reflected wave travelling in the negative x -direction. The acoustic wave reflected from the active impedance projector vanishes.

The problem can be set up and solved with as few as two reference **hydrophones** (i.e. $n = 2$) [42]. However, additional observations of the acoustic pressure when $n > 2$ improves the realization of the plane progressive wave. Uncertainties in the **vector receiver** calibrations also benefit by averaging across uncertainties in the observed acoustic pressures $p_i(t)$, including uncertainties in the complex sensitivities $\underline{M}_{0,i}$ of the reference **hydrophones**.

11.2.2.3 Verifying the solution for the plane progressive wave

Once the terms in the complex amplitudes of the time harmonic projector drive voltage signals $\underline{U}_p$ are determined, they are applied simultaneously to the projectors. The resulting acoustic field is observed by the reference **hydrophones** to verify that a unidirectional plane progressive wave exists in the **acoustic waveguide**. The objective of the measurement system is to generate an acoustic field such that $A = P_0$ and $B \rightarrow 0$.

Expansion of Formula (37) for the acoustic pressures at the locations of the reference **hydrophones** yields Formula (42) as the model of an acoustic field composed of the superposition of two unidirectional plane progressive waves travelling in opposite directions.

$$\begin{bmatrix} e^{-jkx_1} & e^{+jkx_1} \\ e^{-jkx_2} & e^{+jkx_2} \\ \vdots & \vdots \\ e^{-jkx_n} & e^{+jkx_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{F}(p_1(t)) \\ \mathcal{F}(p_2(t)) \\ \vdots \\ \mathcal{F}(p_n(t)) \end{bmatrix} \quad (42)$$

The complex pressure amplitudes A and B are estimated by inversion of Formula (42) to yield Formula (43) as the least-squares estimate for the complex amplitudes of the interfering acoustic waves.

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-jkx_1} & e^{+jkx_1} \\ e^{-jkx_2} & e^{+jkx_2} \\ \vdots & \vdots \\ e^{-jkx_n} & e^{+jkx_n} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathcal{F}(p_1(t)) \\ \mathcal{F}(p_2(t)) \\ \vdots \\ \mathcal{F}(p_n(t)) \end{bmatrix} \quad (43)$$

The ratio of the reflected wave to the travelling wave is

$$R = \left| \frac{B}{A} \right| \quad (44)$$

An acceptable value for calibration of a **vector receiver** is $R < 0,05$, which corresponds to attenuation of the wave reflected by the active impedance of at least 26 dB.

11.2.3 Sensitivity calculations

11.2.3.1 Calculating sensitivity by comparison with one reference hydrophone

The sensitivity of a **vector receiver** can be calculated by comparison with one reference **hydrophone** located at the same axial displacement x in the **acoustic waveguide** as the **vector receiver** being calibrated.

Once the plane progressive wave field is established and verified, the voltage output by the **vector receiver** can be compared to the acceleration measured by i th reference **hydrophone** located at the same distance x_i in the **acoustic waveguide**, and the acceleration sensitivity shall be calculated as follows:

$$|M_a| = \frac{\rho c}{\omega} \left| \frac{\mathcal{F}(U_a(t)) M_{0,i}}{\mathcal{F}(U_i(t))} \right| \quad (45)$$

11.2.3.2 Calculating sensitivity by comparison with the computed acoustic field

The sensitivity of a **vector receiver** can be calculated by comparison with the complex **sound particle** motion amplitude computed by least-squares inversion of data measured simultaneously by the reference **hydrophones** inside the **acoustic waveguide**.

Once the plane progressive wave field is established, the voltage output by the **vector receiver** located at the distance x can be compared to the acceleration calculated using Formula (43) to provide the acceleration sensitivity as follows:

$$|M_a| = \frac{\rho c}{\omega A} |\mathcal{F}(U_a(t))| \quad (46)$$

11.2.4 Uncertainty

The overall uncertainty for the travelling wave tube calibration shall be determined and expressed with the value for the sensitivity. The overall sensitivity uncertainty (95 % confidence levels) of the calibration can be less than 0,7 dB with careful practice.

12 Reporting of results

12.1 Sensitivity

The results for **vector receiver** sensitivity shall be reported for each receiving channel and each acoustic frequency of measurement.

The results for **sound particle velocity sensitivity** of a **vector receiver** channel shall be reported in units of volt second per metre ($V \cdot s \cdot m^{-1}$).

The results for **sound particle acceleration sensitivity** of a **vector receiver** channel shall be reported in units of volt second square per metre ($V \cdot s^2 \cdot m^{-1}$).

The results for **sound particle displacement sensitivity** of a **vector receiver** channel shall be reported in units of volt per metre ($V \cdot m^{-1}$).

The results for **sound pressure gradient sensitivity** of a **vector receiver** channel shall be reported in units of volt metre per pascal ($\text{V}\cdot\text{m}\cdot\text{Pa}^{-1}$).

12.2 Sensitivity level

If the results for **vector receiver** sensitivity are required to be expressed as a level, they shall be reported for each receiving channel and each acoustic frequency of measurement.

The results for the **sound particle velocity sensitivity level** of a **vector receiver** channel shall be reported in unit of decibels, with a reference value of $1 \text{ V}\cdot\text{s}\cdot\text{nm}^{-1}$.

The results for the **sound particle acceleration sensitivity level** of a **vector receiver** channel shall be reported in unit of decibels, with a reference value of $1 \text{ V}\cdot\text{s}^2\cdot\mu\text{m}^{-1}$.

The results for the **sound particle displacement sensitivity level** of a **vector receiver** channel shall be reported in unit of decibels, with a reference value of $1 \text{ V}\cdot\text{m}\cdot\text{pm}^{-1}$.

The results for the **sound pressure gradient sensitivity level** of a **vector receiver** channel shall be reported in unit of decibels, with a reference value of $1 \text{ V}\cdot\text{m}\cdot\mu\text{Pa}^{-1}$.

It is recommended that the sensitivity is included in S.I. units alongside the sensitivity level.

12.3 Environmental considerations for calibration

Properties of the **vector receiver** shall vary with properties of the acoustic medium including temperature, hydrostatic pressure, density and sound speed.

Where the sensitivity of a **vector receiver** is required for specific conditions of water properties (temperature, hydrostatic pressure, density and sound speed), the **vector receiver** shall either be calibrated under the same conditions as will be applicable during use of the **vector receiver** to measure sound fields, or corrections to **vector receiver** sensitivity shall be made based on earlier calibrations or validated analytical models.

12.4 Calibration uncertainties

The calibration uncertainty shall be reported alongside the sensitivity, and be expressed as an expanded uncertainty for a coverage factor $k = 2$.

The uncertainty shall be evaluated in conformance with ISO/IEC Guide 98-3. See Annex C for guidance on sources of uncertainty in calibration of **vector receivers**.

NOTE The calibration uncertainty is ideally expressed as a relative uncertainty in decibels or as a percentage.

12.5 Auxiliary metadata

Any calibration is only valid on the date of calibration and for the environmental conditions which existed during the calibration. When the result of the calibration of a **vector receiver** is reported, the environmental conditions that pertain to that calibration shall be stated, including all those conditions that can influence the sensitivity of the device.

Conditions that shall be reported are:

- date of the calibration.
- temperature of acoustic medium (water);
- depth of immersion or hydrostatic pressure;
- type of mount or rigging used;
- length of soaking time and wetting procedure used;
- orientation of the transducer about any axis or alignment mark;
- alignment method (manually or acoustically aligned).

NOTE Other conditions that are important to report include

- maximum acoustic pressure experienced by the **vector receiver**;
- separation distances used in the calibration;
- electrical drive voltages or currents or both;
- acoustic medium (fresh water or sea water), including its density and sound speed;
- any assumptions made about the device under test (e.g. the position of the reference centre).

13 Recalibration periods

An appropriate period between calibrations shall be chosen after consideration of the use that is made of the **vector receiver** and the likelihood for damage to the device.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63305:2024

Annex A (informative)

Directional response of a vector receiver

A.1 General principle

A complete determination of the performance characteristics of a **vector receiver** should include a measurement of its **directional response** at representative frequencies.

The measurements require that a rotational stage be incorporated into the positioning system, with the **vector receiver** mount aligned such that the **vector receiver** reference centre is located along the axis of rotation. The **vector receiver** channel under test is rotated about the axis and measurements are made of the received signal as a function of angle in a specified plane.

The **vector receiver** co-vibrating with the **sound particle** in the sound wave field is firstly suspended on a mounting ring (see Figure 2).

In practice, for efficiency and reliability, the control of the rotation stage and the signal acquisition are automated and under computer control.

A.2 Types of measurement implementation

Two methods of implementing the rotation – discrete rotation intervals and continuous rotation – are in general feasible (see IEC 60565-1:2020, Clause A.2).

A.3 Coordinate system

The angular coordinate system chosen is that specified by IEC 60500:2017.

A.4 Measurement of vector receiver directional response

With the **vector receiver** under test deployed in the water, the projector is driven with a signal of fixed amplitude and the **vector receiver** is rotated about an axis through the reference centre through the required angular range, with measurements of the received voltage signal made at the **vector receiver** for each known angle of rotation and at the required angular resolution. The **vector receiver** voltage is measured in accordance with 7.3.

NOTE 1 It is not necessary to calibrate the projector. However, any instability in its output throughout the measurements will contribute to the measurement uncertainty.

NOTE 2 The zero radian angle is normally chosen to be the reference direction of the **vector receiver**.

The **directional response** is typically presented graphically, either in the form of a two-dimensional polar or a Cartesian plot. For both plots, the amplitude scale is most often in terms of the normalized **directional response** expressed as a level in decibels (angular deviation loss).

A.5 Calculation of angular deviation loss

The **directional response** is calculated by normalizing the response at a specified reference angle. The **directional response** level $L_{D,\theta}$ expressed in decibels can be calculated from:

$$L_{D,\theta} = 20 \log_{10} \left(\frac{U_{\theta}(\theta)}{U_{\text{ref}}} \right) \text{ dB} \quad (\text{A.1})$$

where $U_{\theta}(\theta)$ is the array of output voltages of **vector receiver** channel measured at the range of angles, θ , and U_{ref} is the reference voltage used for the normalization.

The **axial angular deviation loss** and **lateral angular deviation loss** of the **vector receiver** channel can be calculated from the measurement results of the **directional response**.

NOTE The reference voltage can be measured in the **vector receiver** channel reference direction or direction of the principal axis of the projector, but it is most often chosen to be the maximum value of the voltage measured at any angle.

A.6 Uncertainty

The uncertainty in **directional response** measurement is affected by the same quantities that limit the accuracy of the sensitivity measurement, but there are some additional limitations. A larger separation distance is generally required.

If the reference centre is not located accurately on the axis of rotation, the varying separation distance can cause errors in the measurement of **directional response**.

For **vector receiver** channel to be calibrated at angles close to the maximum of the main beam, uncertainties in the **directional response** are typically about 0,5 dB (for a confidence level of 95 %). An additional uncertainty of 1 dB for each angular deviation loss between 10 dB and 30 dB can be expected.

Annex B (informative)

Inertial vector receiver calibration using optical interferometry in air

B.1 General

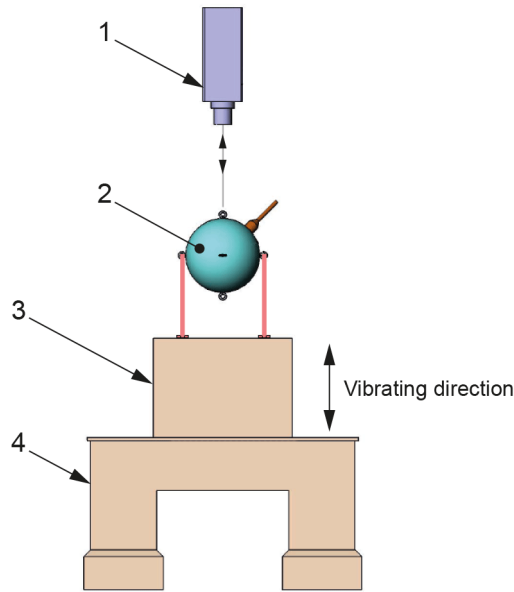
Annex B describes an absolute method of calibration in air only for **inertial vector receiver** based on optical interferometry. The method is primarily used over the frequency range from a few hertz to several kilohertz. It is an absolute calibration method for the **sound particle velocity sensitivity**, **sound particle acceleration sensitivity**, and **sound particle displacement sensitivity** of the **inertial vector receiver** channel [43].

B.2 Principle

In the calibration, the **inertial vector receiver** to be calibrated is rigidly fixed on a shaker driven with a sinusoidal signal and co-vibrates with the shaker. The **sound particle velocity**, **sound particle acceleration** or **sound particle displacement** of the **inertial vector receiver** channel is determined by measuring the motion of the **inertial vector receiver**. Simultaneously, the output voltage of the **inertial vector receiver** channel is measured. The **sound particle velocity sensitivity**, **sound particle acceleration sensitivity** or **sound particle displacement sensitivity** is then calculated from the quotient of the output voltage and the **sound particle velocity**, **sound particle acceleration** or **sound particle displacement**.

B.3 Procedure

Figure B.1 shows the schematic diagram of calibration using an optical interferometer in air for **inertial vector receiver**. A shaker is deployed on a vibration isolation platform. A three-dimensional orthogonal **inertial vector receiver** is rigidly fixed on the shaker with one receiving channel to be calibrated parallel to the vibrating direction of the shaker. The laser beam radiated from an optical interferometer is incident perpendicularly to the surface of the **inertial vector receiver**, and reflects to the optical interferometer.



Key

- 1 optical interferometer
- 2 **vector receiver**
- 3 shaker
- 4 vibrating isolation platform

Figure B.1 – Schematic diagram of calibration using optical interferometer in air for inertial vector receiver

NOTE 1 In theory, the **inertial vector receiver** can be considered as a rigid body and elastic deformations of material used to encapsulate the **inertial vector receiver** are small and can be neglected.

NOTE 2 The **inertial vector receiver** can be approximated as a spherical body. The radius of the **inertial vector receiver** is d_0 , and the wavenumber in water is k , the calibration is performed in the condition $kd_0 \ll 1$.

NOTE 3 The effect of reflecting and scattering by the **inertial vector receiver** itself during measurement is small and can be neglected.

When the shaker is excited by continuous sinusoidal signals, the output voltage signal of the **inertial vector receiver** channel $\underline{U}_{VR}(t)$ and the motion parameter (**sound particle acceleration** or **sound particle displacement**) are measured. The **sound particle velocity** can be calculated, and the **sound particle velocity sensitivity** in air, $\underline{M}_{u,a}$, is given by the following expression:

$$|\underline{M}_{u,a}| = \frac{|\mathcal{F}(U_{VR}(t))|}{|\underline{u}|} = \frac{|\mathcal{F}(U_{VR}(t))|}{K_i \cdot |\mathcal{F}(U_i(t))|} \quad (\text{B.1})$$

where $U_i(t)$ is the output voltage signal of the optical interferometer, and K_i is the sensitivity coefficient of the optical interferometer.

There is a coefficient K_{a-w} when converting the sensitivity in air to the sensitivity in water, which is given as follows:

$$K_{a-w} = \frac{3\rho}{2\bar{\rho} + \rho} \quad (\text{B.2})$$

where $\bar{\rho}$ is the average density of the **inertial vector receiver**, and ρ is the density of water.

Then, the **sound particle** sensitivity in water $\underline{M}_u$ is the product of the **sound particle velocity sensitivity** in air $\underline{M}_{u,a}$ and conversion coefficient K_{a-w} , which means

$$|\underline{M}_u| = K_{a-w} \cdot \underline{M}_{u,a} = \frac{3\rho}{2\bar{\rho} + \rho} \cdot \frac{|\mathcal{F}(U_{VR}(t))|}{K_i |\mathcal{F}(U_i(t))|} \quad (\text{B.3})$$

If the average density of the **inertial vector receiver** $\bar{\rho}$ is equal to the density of water ρ , Formula (B.3) can be simplified to be Formula (B.1).

The same principle applies in calibration of **sound particle acceleration sensitivity** in air $\underline{M}_{a,a}$ and **sound particle displacement sensitivity** in air $\underline{M}_{d,a}$, and their conversion.

B.4 Discussion

This method has the advantages of calibrating the **inertial vector receiver** at very low frequencies without strict requirements for the sound field. As it is calibrated in air, the **inertial vector receiver** is easy to install and remove in the laboratory.

NOTE At very low frequency range, the mount is designed to avoid the effect of vibration on **inertial vector receiver**, or the effect can be neglected.

The method is only suitable for calibration of **inertial vector receivers** which are based on the use of accelerometers or geophones. The shortcoming of the method is that the sensitivities of **inertial vector receiver** cannot be obtained directly, there is a conversion coefficient between sensitivities in water and air to be determined.

Annex C (informative)

Assessment of uncertainty of vector receiver calibration

C.1 General

To be truly meaningful, the result of a calibration should be accompanied by its associated uncertainty.

In general, uncertainty components are grouped according to how the values are estimated:

Type A – evaluated by statistical means;

Type B – evaluated by other means.

C.2 Type A evaluation of uncertainty

This can be obtained from a statistical analysis of the repeatability of the calibrations.

Ideally, the repeated measurements should be truly independent repeats, with the **vector receivers** removed from the water and remounted before the calibration is repeated.

Where it is not feasible to undertake independent repeats, and where historical data exist for the repeatability of the measurements with the devices in question, values for the typical repeatability for calibration of a **vector receiver** can be used.

This assessment should follow a type B evaluation.

C.3 Type B evaluation of uncertainty

Type B components of uncertainty are those that are not assessed by statistical means, in other words those components that remain constant when the measurement is repeated. For example, any systematic bias in a measurement can be regarded as a Type B contribution. Similarly, the uncertainty in the calibration of a calibrated instrument provides a Type B contribution.

The sources of these components should be identified by assessing all the influences which can introduce uncertainty into the measurement. These will be different for each measurement system and should be assessed individually. The value of each component should be estimated along with an associated probability distribution.

C.4 Reported uncertainty

The combined uncertainty should be obtained from the individual components. All components should be expressed as standard uncertainties before being combined. The method used to combine the components requires the formulation of a model that relates the result of the calibration to all quantities that are measured or subject to uncertainty.

When stating the reported uncertainty, it should be expressed as expanded uncertainty. In this case, the level of confidence and the coverage factor should also be stated.

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

NOTE 1 The use of decibels to express uncertainties can lead to asymmetric distributions (e.g. +1,5 dB is equivalent to +19 %, but -1,5 dB is equivalent to -16 %).

NOTE 2 When each component of uncertainty is small, i.e. much less than 1 dB, the combined uncertainty can be calculated using decibels.

C.5 Common sources of uncertainty

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

Once the sources of uncertainty have been identified, each is assessed by either a Type A or Type B evaluation. In most cases for the components listed below, a Type B evaluation is most appropriate. However, where a parameter has been estimated from repeated measurements (a possible example is the measurement of separation distance in a reciprocity calibration), a Type A evaluation can also be required.

Sources of uncertainty specific to the **vector receiver** reciprocity calibration in free field:

- uncertainties of any assumptions about the acoustic field;
- uncertainties of signal distortion;
- non-reciprocal behaviour of reciprocal transducer;
- uncertainties in the measurement of the separation distance;
- uncertainties in the values for the sound signal measurement;
- uncertainties in the values for acoustic frequency;
- uncertainties in the values for water density;
- uncertainties in the direction of **vector receiver**;
- uncertainties in the noise underwater;
- uncertainties in the measurement of sound speed in free-field.

Sources of uncertainty specific to the **vector receiver** using optical interferometry in free-field:

- uncertainties of any assumptions about the acoustic field;
- uncertainties of signal distortion;
- uncertainties in the measurement of the separation distance;
- uncertainties in the values for the electrical signal measurement;
- uncertainties in the values for acoustic frequency;
- uncertainties in the values for water density;
- uncertainties in the measurement of sound speed in free-field;
- uncertainties in the sensitivity coefficient calibration of the optical interferometer;
- uncertainties in the direction of **vector receiver**;
- uncertainties in the value for equivalent refractive index of medium when the sound wave exists;
- uncertainties of the impact on the sound field of the pellicle;
- uncertainties of the special average effect of the **vector receiver**;
- uncertainties of the environmental vibration.

Sources of uncertainty specific to the **vector receiver** comparison calibration in free field:

- uncertainties in the calibration of reference **hydrophone** (a major source of uncertainty in a comparison calibration);
- differences in environmental conditions for the comparison calibration compared with those that existed during the absolute calibration of the reference **hydrophone**, which would cause a change in sensitivity for the reference **hydrophone**;
- uncertainties of any assumptions about the acoustic field;
- uncertainties in the measurement of the separation distance;
- uncertainties in the values for the sound signal measurement;
- uncertainties in the values for acoustic frequency;
- uncertainties in the direction of **vector receiver**;
- uncertainties in the noise underwater;
- uncertainties in the measurement of sound speed in free-field.

Sources of uncertainty specific to the **vector receiver** calibration using reference accelerometer in standing wave tube:

- uncertainties of any assumptions about the acoustic field;
- uncertainties caused by the design and fabrication of the vessel;
- uncertainty in the value for density of the liquid;
- uncertainty in the value of the depth;
- uncertainties in the values for the sound signal measurement;
- uncertainties in the values for acoustic frequency;
- uncertainties in the direction of **vector receiver**;
- uncertainties in the measurement of sound speed in standing wave tube;
- uncertainties in the noise underwater.

Sources of uncertainty specific to the **vector receiver** calibration using reference **hydrophone** in standing wave tube:

- uncertainties in the calibration of reference **hydrophone** (a major source of uncertainty in a comparison calibration);
- differences in environmental conditions for the comparison calibration compared with those that existed during the absolute calibration of the reference **hydrophone**, which would cause a change in sensitivity for the reference **hydrophone**;
- uncertainties of any assumptions about the acoustic field;
- uncertainty in the value of depth;
- uncertainties in the values for the sound signal measurement;
- uncertainties in the values for acoustic frequency;
- uncertainties in the direction of **vector receiver**;
- uncertainties in the measurement of sound speed in standing wave tube;
- uncertainties in the noise underwater.

Sources of uncertainty specific to the **vector receiver** calibration in horizontal standing wave tube:

- uncertainties in the calibration of reference **hydrophone** (a major source of uncertainty in a comparison calibration);
- differences in environmental conditions for the comparison calibration compared with those that existed during the absolute calibration of the reference **hydrophone**, which would cause a change in sensitivity for the reference **hydrophone**;

- uncertainties of any assumptions about the acoustic field;
- uncertainty in the value of measurement distance;
- uncertainties in the values for the sound signal measurement;
- uncertainties in the values for acoustic frequency;
- uncertainties in the direction of **vector receiver**;
- uncertainties in the measurement of sound speed in standing wave tube;
- uncertainties in the noise underwater.

Sources of uncertainty specific to the **vector receiver** calibration using optical interferometry in standing wave tube:

- uncertainties of any assumptions about the acoustic field;
- uncertainty in the value of depth;
- uncertainties of signal distortion;
- uncertainties in the values for the electrical signals measurement;
- uncertainties in the values for acoustic frequency;
- uncertainties in the direction of **vector receiver**;
- uncertainties in the sensitivity coefficient calibration of the optical interferometer;
- uncertainties of the special average effect of the **vector receiver**;
- uncertainties of the environmental vibration.

Sources of uncertainty specific to the **vector receiver** calibration in travelling wave tube:

- uncertainties in the calibration of reference **hydrophone**;
- uncertainties of any assumptions about the plane progressive wave field;
- uncertainty in the calculation of complex acoustic transfer matrix;
- uncertainties in the values for the sound signal measurement;
- uncertainties in the values for acoustic frequency;
- uncertainties in the direction of **vector receiver**.

Bibliography

- [1] R. J. Bobber. *Underwater electroacoustic measurements*. Peninsula Press, Los Altos CA, 1988
- [2] IEC 60565-1:2020, *Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration of hydrophones – Part 2: Procedures for free-field calibration of hydrophones*
- [3] IEC 60565-2:2019, *Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration of hydrophones – Part 2: Procedures for low frequency pressure calibration*
- [4] A. E. Isaev et al. Results of the COOMET 646/RU/14 pilot comparison of national standards of the unit of sound oscillation velocity of water particles. *Measurement Techniques*, 62, pp. 651-658, 2019
- [5] Yi Chen, Han Zhao and Wenjun Yuan. *Measurements of underwater electroacoustic parameters*. Beijing: Ordnance Industry Publishing House, 2017 (In Chinese)
- [6] S. L. Nedelec et al. *Best practice guide for underwater particle motion measurement for biological applications*. Technical report by the University of Exeter for the IOGP Marine Sound and Life Joint Industry Programme
- [7] ISO/IEC Guide 99:2007, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*
- [8] JJF 1340-2012, Calibration specification for vector hydrophones in the frequency range 20 Hz to 2000 Hz (In Chinese)
- [9] James A. McConnell. Analysis of a compliantly suspended acoustic velocity sensor. *J. Acoust. Soc. Am.*, 113(3), pp. 1395-1405, 2003
- [10] A. E. Isaev and A. N. Matveev. Two approaches to hydrophone free-field calibration at continuous radiation in non-anechoic water tank. *Measurement Engineering*, 12, pp. 47-51, 2008
- [11] A. E. Isaev and A. N. Matveev. Use of a complex moving weighted averaging method for receiver non-uniform frequency response restoration. *Acoustical Physics*, 56(5), pp. 693-696, 2010
- [12] S. P. Robinson, G. Hayman, P. M. Harris and G. A. Beamiss. Signal-modelling methods applied to the calibration of hydrophones and projectors in laboratory test tanks in the frequency range 250 Hz to 5 kHz. *Meas. Sci. Technol.*, 29, 035012, 2018
- [13] Yi Chen, Liuqing Yang, Lisheng Zhou, Xiaofeng Jin and Guanghui Jia. Calibration of hydrophones using a frequency domain filter processing method: theory and experiment. *Meas. Sci. Technol.*, 32, 035012, 2021
- [14] A. E. Isaev, A. N. Matveev, G. S. Nekrich and A. M. Polikarpov. Free-field calibration of a pressure gradient receiver in a reflecting water tank using a linear frequency-modulated signal. *Acoustical Physics*, 59(6), pp. 722-729, 2013
- [15] P.C. Pedersen, P.A. Lewin and L. Bjorno. Application of time delay spectrometry for calibration of ultrasonic transducers. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 35(2), pp. 185-205, March 1988

- [16] A. E. Isaev, A. N. Matveev and G. S. Nekrich. Complex calibration of a pressure gradient receiver using the reciprocity method procedure. *Acoustical Physics*, 60(1), pp. 45–51, 2014
- [17] Yi Chen, A. E. Isaev, Guanghui Jia and Teng Fei. Calibration methods of vector receivers in the frequency range 5 Hz to 10 kHz and their comparison verifications. in *Proceedings of the 5th International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics*, Crete, Greece, 2019
- [18] Guanghui Jia, Yi Chen, Zihong Ping and Teng Fei. Low frequency absolute calibration of complex sensitivity of vector receiver in free-field. *MATEC Web of Conferences* 283 (FCAC2018), 05003, 2019
- [19] A. E. Isaev, A. N. Matveev, G. S. Nekrich and A. M. Polikarpov. Features of the transfer of the unit of oscillatory velocity of particles of the aquatic environment in the State primary standar GET 55-2017. *Al'manac of Modern Metrology*, No. 1(17), pp. 116-136, 2019 (In Russian)
- [20] Isaev A.E. Patent No. 2573446, RU, C1. H04R. A method for determining the free-field amplitude-frequency and phase-frequency responses of an underwater sound receiver. Published in Bulletin of Inventions No. 2, 01/20/2016 (In Russian)
- [21] P. Theobald et al., Technique for the calibration of hydrophones in the frequency range 10 to 600 kHz using a heterodyne interferometer and an acoustically compliant membrane, *J. Acous. Soc. Am.*, 118(5), pp. 3110-3116, 2005
- [22] Shiquan Wang, Yi Chen, Yongjun Huang and Yuebing Wang. Calibration of hydrophones in the frequency range 1 kHz to 200 kHz using optical method, *Proceedings of the 2nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics*, Greece, pp. 1103-1108, 2014
- [23] Guanghui Jia, Yi Chen, Shiquan Wang, Liuqing Yang and Weiyin Wang. Calibration methods and facilities for vector receivers using a laser Doppler vibrometer in the frequency range 20 Hz to 10 kHz, *J. Acoust. Soc. Am.*, 150(3), pp. 1997-2005, 2021
- [24] JJF 1588-2016, Calibration specification for vector hydrophones in the frequency range 1 kHz to 10 kHz (Free-field comparison method) (In Chinese)
- [25] Isaev A.E. Patent No. 2563603, RU, C1. H04R. A method for determining free-field sensitivity of an underwater sound receiver. Published in Bulletin of Inventions No. 26, 09/20/2015 (In Russian)
- [26] JJG 1182-2021, Vector hydrophones in the frequency range 20 Hz to 1 kHz (In Chinese)
- [27] M. Strasberg and F. Schloss. Calibration of pressure gradient transducers in an oscillating liquid column. *J. Acous. Soc. Am.*, 54(2), pp. 553, 1973
- [28] V. E. Ivanov and V. A. Kirshov. Calibration of gradient hydrophones. *Measurement Techniques*, 24, pp. 790-794, 1981
- [29] V. A. Gordienko, E. I. Gordienko, A. V. Dryndin and S. M. Likhaev. Absolute pressure calibration of acoustic receivers in a vibrating column of liquid. *Acoustical physics*, 40(2), pp. 219-222, 1994
- [30] Jia Guanghui, Chen Yi, Isaev A. E., Fei Teng and Matveev A. N. Technical discussion about COOMET Pilot Comparison results of sound pressure sensitivity and sound pressure gradient sensitivity in the frequency range 5 Hz to 400 Hz. *Proceedings of the*

49th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Madrid, Spain, 2019

- [31] Xiping Mo, Wenzhi Wang and Shijie Zheng. Calibration of hydrophone in a standing wave calibration system for dipole hydrophone. *Applied Acoustics*, 17(6), pp. 158-160, 1998 (In Chinese)
- [32] R. D. Lenhart, J. D. Sagers and W. S. Preston. Development of a standing wave apparatus for calibrating acoustic vector and hydrophones. *J. Acoust. Soc. Am.*, 139(1), pp. 176-187, 2016
- [33] B. B. Bauer. Laboratory calibrator for gradient hydrophones. *J. Acoust. Soc. Am.*, 39(3), pp. 585-586, 1966
- [34] B. B. Bauer, L. A. Abbagnaro and J. Schumann. Wide range calibration system for pressure gradient hydrophones. *J. Acoust. Soc. Am.*, 51(5). PT2, pp. 1717-1724, 1972
- [35] Yaoquan Xue and Changshou Tang. Calibration of the sensitivity of pressure gradient hydrophones. *Acoustics and Electronics Engineering*, 43, pp. 22-26, 1996 (In Chinese)
- [36] A. E. Isaev, A. N. Matveev and G. S. Nekrich. Application of sound reflection for the confirmation of the possibility of calibrating vector receivers in undamped tanks. *Measurement Techniques*, 62(9), pp. 825-831, 2019
- [37] L. G. Beatty, R. J. Bobber and D. L. Phillips. Sonar transducer calibration in a high-pressure tube. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 39, p. 48-54, 1966
- [38] R. M. Drake and S. E. Forsythe. Low frequency hydrophone calibration in a standing/traveling wave tube. *Proceedings of the European Conference on Underwater Acoustic Measurements Technologies and Results*, p. 429-436, Crete, Greece, 2007
- [39] R. J. Bobber. Active load impedance. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 34, p. 282-288, 1962
- [40] L. G. Beatty. Acoustic impedance in a rigid-walled cylindrical sound channel terminated at both ends with active transducers. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 36, p. 1081-1089, 1964
- [41] J. C. Piquette and S. E. Forsythe. Low-frequency echo-reduction and insertion-loss measurements from small passive-material samples under ocean environmental temperatures and hydrostatic pressures. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 110, p. 1998-2006, 2001
- [42] P. S. Wilson, R. A. Roy and W. M. Carey. An improved water-filled impedance tube. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 133, p. 3245-3252, 2003
- [43] ISO 16063-11:1999, *Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63305:2024

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	67
INTRODUCTION.....	69
1 Domaine d'application	70
2 Références normatives	70
3 Termes et définitions	71
4 Liste de symboles.....	77
5 Relation entre les grandeurs vectorielles dans le champ acoustique.....	79
6 Procédures générales d'étalonnage.....	79
6.1 Exigences générales d'étalonnage.....	79
6.1.1 Types d'étalonnages.....	79
6.1.2 Exigences du champ acoustique.....	80
6.2 Exigences relatives au tube à ondes stationnaires acoustiques.....	80
6.2.1 Exigences relatives au tube à ondes stationnaires [8].....	80
6.2.2 Exigences relatives à la profondeur d'immersion des transducteurs.....	81
6.3 Exigences relatives au tube à ondes progressives acoustiques.....	82
6.3.1 Exigences relatives au signal d'entraînement.....	82
6.3.2 Exigences relatives au tube à ondes progressives.....	83
6.4 Exigences relatives au matériel.....	83
6.4.1 Installation d'étalonnage.....	83
6.4.2 Instruments	83
6.5 Positionnement et alignement.....	86
6.5.1 Système de coordonnées	86
6.5.2 Direction de référence	86
6.5.3 Montage et support du transducteur	86
6.5.4 Alignement	87
6.6 Représentation de la réponse en fréquence.....	88
6.7 Limites de fréquence.....	88
6.7.1 Limite de haute fréquence	88
6.7.2 Limite de basse fréquence.....	88
6.8 Contrôles des interférences acoustiques.....	89
7 Mesurages électriques.....	89
7.1 Forme du signal.....	89
7.2 Mise à la terre électrique	89
7.3 Mesurage de la tension de sortie du transducteur	89
7.3.1 Généralités.....	89
7.3.2 Analyse du signal	90
7.3.3 Charge électrique par les appareils de mesure	90
7.3.4 Charge électrique par les câbles prolongateurs	90
7.3.5 Bruit électrique	90
7.3.6 Diaphonie	91
7.3.7 Préamplificateurs intégrés	91
7.4 Mesurage du courant d'attaque du projecteur.....	91
7.4.1 Instruments	91
7.4.2 Analyse du signal	92
8 Préparation de mesure	92
8.1 Préparation des transducteurs	92

8.1.1	Trempage	92
8.1.2	Mouillage	92
8.2	Conditions d'environnement (température et profondeur)	92
9	Étalonnage en champ libre	93
9.1	Étalonnage par réciprocité en champ libre	93
9.1.1	Généralités	93
9.1.2	Principe	93
9.1.3	Mesurage	95
9.1.4	Incertitude	95
9.2	Étalonnage en champ libre par interférométrie optique	96
9.2.1	Généralités	96
9.2.2	Principe	96
9.2.3	Mesurage	97
9.2.4	Incertitude	97
9.3	Étalonnage en champ libre à l'aide d'un hydrophone de référence	97
9.3.1	Généralités	97
9.3.2	Principe	97
9.3.3	Mesurage	98
9.3.4	Incertitude	99
10	Étalonnage dans un tube à ondes stationnaires	99
10.1	Étalonnage à l'aide d'un accéléromètre de référence	99
10.1.1	Généralités	99
10.1.2	Principe	99
10.1.3	Mesurage	101
10.1.4	Incertitude	101
10.2	Étalonnage par comparaison à l'aide d'un hydrophone de référence dans un tube à ondes stationnaires	101
10.2.1	Généralités	101
10.2.2	Principe	101
10.2.3	Mesurage	103
10.2.4	Incertitude	103
10.3	Étalonnage dans un tube à ondes stationnaires horizontales	103
10.3.1	Généralités	103
10.3.2	Principe	103
10.3.3	Mesurage	105
10.3.4	Incertitude	105
10.4	Étalonnage par interférométrie optique dans un tube à ondes stationnaires	105
10.4.1	Généralités	105
10.4.2	Principe	105
10.4.3	Mesurage	107
10.4.4	Incertitude	107
11	Étalonnage dans un tube à ondes progressives	107
11.1	Généralités	107
11.2	Principe	108
11.2.1	Généralités	108
11.2.2	Établissement d'un champ d'ondes progressives planes unidirectionnelles	109
11.2.3	Calculs de la sensibilité	112
11.2.4	Incertitude	112

12	Consignation des résultats	113
12.1	Sensibilité	113
12.2	Niveau de sensibilité	113
12.3	Considérations environnementales pour l'étalonnage	113
12.4	Incertitudes d'étalonnage	114
12.5	Métadonnées auxiliaires	114
13	Périodes de réétalonnage	114
Annexe A (informative) Réponse directionnelle d'un récepteur vectoriel		115
A.1	Principe général	115
A.2	Types de mises en œuvre de mesure	115
A.3	Système de coordonnées	115
A.4	Mesurage de la réponse directionnelle du récepteur vectoriel	115
A.5	Calcul de la perte de déviation angulaire	116
A.6	Incertitude	116
Annexe B (informative) Étalonnage des récepteurs vectoriels inertiels par interférométrie optique dans l'air		117
B.1	Généralités	117
B.2	Principe	117
B.3	Mode opératoire	117
B.4	Présentation	119
Annexe C (informative) Évaluation de l'incertitude d'étalonnage des récepteurs vectoriels		120
C.1	Généralités	120
C.2	Évaluation de type A de l'incertitude	120
C.3	Évaluation de type B de l'incertitude	120
C.4	Incertitude déclarée	120
C.5	Sources communes d'incertitude	121
Bibliographie		124
Figure 1 – Structure de la chambre d'étalonnage		81
Figure 2 – Récepteur vectoriel co-vibrant suspendu à un anneau de montage		87
Figure 3 – Cadre de mesure pour l'étalonnage par réciprocité en champ libre du récepteur vectoriel		93
Figure 4 – Schéma d'étalonnage en champ libre du récepteur vectoriel par interféromètre optique		96
Figure 5 – Schéma d'étalonnage par comparaison en champ libre du récepteur vectoriel à l'aide d'un hydrophone de référence		98
Figure 6 – Schéma d'étalonnage dans un tube à ondes stationnaires verticales à l'aide d'un accéléromètre de référence		100
Figure 7 – Schéma d'étalonnage dans un tube à ondes stationnaires verticales à l'aide d'un hydrophone de référence		102
Figure 8 – Schéma du principe d'étalonnage et étalonnage d'un tube à ondes stationnaires horizontales		104
Figure 9 – Schéma d'étalonnage par interféromètre optique d'un récepteur vectoriel dans un tube à ondes stationnaires		106
Figure 10 – Schéma d'étalonnage d'un récepteur vectoriel dans un tube à ondes progressives		108
Figure B.1 – Schéma d'étalonnage d'un récepteur vectoriel inertiel par interféromètre optique dans l'air		118

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**ACOUSTIQUE SOUS MARINE – ÉTALONNAGE DES RÉCEPTEURS
VECTORIELS D'ONDES ACOUSTIQUES DANS LA PLAGE DE
FRÉQUENCES DE 5 Hz À 10 kHz**

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'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevets. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à la portée de ces droits de propriété. À la date de publication du présent document, l'IEC n'a reçu aucune déclaration relative à des droits de brevets, qui pourraient être exigés pour la mise en œuvre du présent document. Toutefois, il est rappelé aux responsables de cette mise en œuvre qu'il ne s'agit peut-être pas des informations les plus récentes, qui peuvent être obtenues dans la base de données 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 63305 a été établie par le comité d'études 87 de l'IEC: Ultrasons. Il s'agit d'une Norme internationale.

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

Projet	Rapport de vote
87/839/FDIS	87/843/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.

NOTE Les mots 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

Contrairement aux **hydrophones** piézoélectriques traditionnels qui sont sensibles à la pression acoustique, les **récepteurs vectoriels** mesurent le mouvement des **particules acoustiques** (vitesse, accélération ou déplacement) ou le **gradient de pression acoustique**, et ont une **réponse** fortement **directionnelle** dans leur plage de fréquences de fonctionnement. Le présent document prend en considération l'étalonnage de ces **récepteurs vectoriels** qui mesurent le mouvement des **particules acoustiques** ou le **gradient de pression acoustique**.

La tension de sortie d'un canal de **récepteur vectoriel** à étalonner est proportionnelle au mouvement des **particules acoustiques** ou au **gradient de pression acoustique** au centre de référence du récepteur. La directivité du canal de **récepteur vectoriel** est indépendante de la fréquence acoustique, et le rapport de la tension de sortie du canal du récepteur à l'angle θ à la tension de sortie maximale sur la direction axiale est égal à $|\cos\theta|$ [1]¹.

Les développements récents des **récepteurs vectoriels d'ondes acoustiques** pour l'acoustique océanique, tels que ceux qui mesurent la **vitesse de particule acoustique**, ont conduit à la mise sur le marché d'un certain nombre de systèmes commerciaux. En plus de fournir des capteurs qui possèdent une certaine directivité utile pour les applications à basse fréquence, ces systèmes sont de plus en plus utilisés pour mesurer l'exposition au bruit sous-marin de la faune marine (par exemple, les poissons et les invertébrés) qui est sensible au mouvement des particules acoustiques plutôt qu'à la pression acoustique. Cependant, l'étalonnage de ces capteurs pose des problèmes techniques et n'est pas couvert par les normes internationales existantes telles que l'IEC 60565 [2], [3]. En s'appuyant sur les travaux entamés en Chine et en Russie [4], pour lesquels une comparaison bilatérale concluante a récemment été finalisée, le présent document établit une Norme internationale sur l'étalonnage des **récepteurs vectoriels** dans la plage de fréquences de 5 Hz à 10 kHz.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

ACOUSTIQUE SOUS MARINE – ÉTALONNAGE DES RÉCEPTEURS VECTORIELS D'ONDES ACOUSTIQUES DANS LA PLAGE DE FRÉQUENCES DE 5 Hz À 10 kHz

1 Domaine d'application

En général, les **récepteurs vectoriels d'ondes acoustiques** sont conçus et construits sur la base de l'un des deux principes suivants. L'un réside sur le principe de la différence de pression acoustique (gradient). Lors du mesurage avec ce capteur, le **récepteur vectoriel** est fixé de manière rigide sur un support et soutenu dans l'eau. L'autre principe repose sur la co-vibration (**inertie**). Lors du mesurage avec ce capteur, le **récepteur vectoriel** est suspendu à un support et soutenu dans l'eau de manière non rigide, ce qui permet une co-vibration de ce dernier dans la même direction que la **particule acoustique** dans le champ d'ondes acoustiques.

De nombreuses méthodes ont été appliquées pour étalonner les **récepteurs vectoriels**, telles que l'étalonnage en champ libre, l'étalonnage dans un tube à ondes stationnaires et l'étalonnage dans un tube à ondes progressives. Le présent document spécifie les méthodes et procédures d'étalonnage des **récepteurs vectoriels** dans la plage de fréquences de 5 Hz à 10 kHz, qui sont applicables aux **récepteurs vectoriels** sur la base de deux principes différents. En outre, il décrit une méthode absolue d'étalonnage des **récepteurs vectoriels inertiels** dans l'air à l'aide de l'interférométrie optique.

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 60500:2017, *Acoustique sous-marine – Hydrophones – Propriétés des hydrophones dans la bande de fréquences de 1 Hz à 500 kHz*

IEC 60565-1:2020, *Acoustique sous-marine – Hydrophones – Étalonnage des hydrophones – Partie 1: Procédures d'étalonnage en champ libre des hydrophones*

ISO 80000-8:2020, *Grandeurs et unités – Partie 8: Acoustique*

ISO 18405:2017, *Acoustique sous-marine – Terminologie*

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

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC 60500:2017, l'IEC 60565-1:2020, l'ISO 80000-8:2020 et l'ISO 18405:2017, ainsi que les suivants s'appliquent.

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

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

3.1

particule acoustique élément matériel

plus petit élément du milieu représentant la masse volumique moyenne du milieu

[SOURCE: ISO 80000-8:2020, 3.1]

3.2

déplacement de particule acoustique

δ

déplacement de **particule acoustique** provoqué par l'action du son

Note 1 à l'article: Le **déplacement de particule acoustique** dépend du temps, t , qui est indiqué au moyen d'un argument t , comme en $\delta(t)$.

Note 2 à l'article: Le **déplacement de particule acoustique** est exprimé en mètres, m.

Note 3 à l'article: Le **déplacement de particule acoustique** est une grandeur vectorielle. Les composantes spatiales du **déplacement de particule acoustique** peuvent être indiquées par l'attribution d'indices au symbole. Par exemple, des coordonnées cartésiennes, $\delta = (\delta_x, \delta_y, \delta_z)$. Par convention en acoustique sous-marine, l'axe z est généralement choisi pour pointer verticalement vers le bas depuis la surface de la mer, avec les axes x et y dans le plan horizontal. Si le **déplacement de particule acoustique** va dans la même direction de propagation que l'onde acoustique, son symbole peut être simplement δ .

[SOURCE: ISO 18405:2017, 3.1.2.9, modifié – Dans la définition, "élément matériel" a été remplacé par "particule acoustique".]

3.3

vitesse de particule acoustique

u

contribution à la vitesse d'une **particule acoustique** provoquée par l'action du son

Note 1 à l'article: La **vitesse de particule acoustique** dépend du temps, t , qui est indiquée au moyen d'un argument t , comme en $u(t)$.

Note 2 à l'article: Pour les ondes acoustiques de faible amplitude dans un milieu par ailleurs stationnaire, la **vitesse de particule acoustique** et le **déplacement de particule acoustique** sont liés par

$$u(t) = \frac{\partial \delta(t)}{\partial t} \quad (1)$$

où $\delta(t)$ est le **déplacement de particule acoustique** au temps, t , et la dérivée partielle est évaluée à une position fixe.

Note 3 à l'article: La **vitesse de particule acoustique** est exprimée en unités de mètre par seconde, m·s⁻¹.

Note 4 à l'article: La **vitesse de particule acoustique** est une grandeur vectorielle. Les composantes spatiales de la **vitesse de particule acoustique** peuvent être indiquées par l'attribution d'indices au symbole. Par exemple, des coordonnées cartésiennes, $u = (u_x, u_y, u_z)$. Par convention en acoustique sous-marine, l'axe z est généralement choisi

pour pointer verticalement vers le bas depuis la surface de la mer, avec les axes x et y dans le plan horizontal. Si la **vitesse de particule acoustique** va dans la même direction de propagation que l'onde acoustique, son symbole peut être simplement u .

[SOURCE: ISO 18405:2017, 3.1.2.10, modifié – Dans la définition, "élément matériel" a été remplacé par "particule acoustique".]

3.4

accélération d'une particule acoustique

a

contribution à l'accélération d'une **particule acoustique** provoquée par l'action du son

Note 1 à l'article: L'**accélération d'une particule acoustique** dépend du temps, t , qui est indiquée au moyen d'un argument t , comme en $a(t)$.

Note 2 à l'article: Pour les ondes acoustiques de faible amplitude dans un milieu par ailleurs stationnaire, l'**accélération** et la **vitesse de particule acoustique** sont liées par

$$a(t) = \frac{\partial u(t)}{\partial t} \quad (2)$$

où $u(t)$ est la **vitesse de particule acoustique** au temps, t , et la dérivée partielle est évaluée à une position fixe.

Note 3 à l'article: L'**accélération d'une particule acoustique** est exprimée en unités de mètre par seconde au carré, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Note 4 à l'article: L'**accélération d'une particule acoustique** est une grandeur vectorielle. Les composantes spatiales de l'**accélération d'une particule acoustique** peuvent être indiquées par l'attribution d'indices au symbole. Par exemple, des coordonnées cartésiennes, $a = (a_x, a_y, a_z)$. Par convention en acoustique sous-marine, l'axe z est généralement choisi pour pointer verticalement vers le bas depuis la surface de la mer, avec les axes x et y dans le plan horizontal. Si l'**accélération d'une particule acoustique** va dans la même direction de propagation que l'onde acoustique, son symbole peut être simplement a .

[SOURCE: ISO 18405:2017, 3.1.2.11, modifié – Dans la définition, "élément matériel" a été remplacé par "particule acoustique".]

3.5

gradient de pression acoustique

∇p

dérivée spatiale de la pression acoustique par rapport à la distance, provoquée par l'action du son

Note 1 à l'article: Le **gradient de pression acoustique** est exprimé en unités de Pascal par mètre, $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$.

Note 2 à l'article: Le **gradient de pression acoustique** est une grandeur vectorielle. En coordonnées cartésiennes, les composantes spatiales du **gradient de pression acoustique** peuvent être indiquées comme $\nabla p = (\partial p / \partial x, \partial p / \partial y, \partial p / \partial z)$. Par convention en acoustique sous-marine, l'axe z est généralement choisi pour pointer verticalement vers le bas depuis la surface de la mer, avec les axes x et y dans le plan horizontal.

3.6

récepteur vectoriel

récepteur vectoriel d'ondes acoustiques

transducteur de réception dont la tension de sortie de son canal de réception est proportionnelle au mouvement d'une **particule acoustique** (déplacement, vitesse ou accélération) ou au **gradient de pression acoustique** sur la position de son centre de référence dans l'eau

Note 1 à l'article: En raison des différentes constructions, le **récepteur vectoriel** peut être un **récepteur vectoriel** unidimensionnel, un **récepteur vectoriel** orthogonal bidimensionnel ou un **récepteur vectoriel** orthogonal tridimensionnel, et il possède différents canaux de réception. Les canaux d'un **récepteur vectoriel** orthogonal tridimensionnel sont généralement appelés canal x , canal y et canal z .

Note 2 à l'article: Le canal de réception du **récepteur vectoriel** a une très forte **réponse directionnelle**, qui est indépendante de la fréquence.

Note 3 à l'article: Selon les valeurs vectorielles perçues, il existe différents **récepteurs vectoriels**, dont le **récepteur vectoriel inertiel** et le **récepteur à gradient de pression acoustique**.

Note 4 à l'article: Parfois, le **récepteur vectoriel** possède un canal de réception de la pression acoustique (scalaire), et la tension en circuit ouvert du canal de pression acoustique est proportionnelle à la pression acoustique sur la position du centre de référence du **récepteur vectoriel**.

Note 5 à l'article: La phase du signal de sortie du canal de réception vectorielle change de 180 degrés lorsque la direction d'incidence de l'onde acoustique passe à la direction opposée, ce qui peut être déterminé en utilisant le signal de sortie d'un canal de réception de la pression acoustique comme signal de référence lorsque le **récepteur vectoriel** est équipé d'un canal de réception de la pression acoustique.

3.7

récepteur vectoriel inertiel

transducteur de réception qui détecte le mouvement d'une **particule acoustique** par mesurage de la réaction d'une masse étalon en réponse au mouvement du corps du capteur (par exemple, accéléromètre, géophone)

3.8

hydrophone

transducteur électroacoustique qui produit des tensions électriques sous l'effet de signaux de pression acoustique transmis dans l'eau

[SOURCE: [IEC 60500:2017, 3.17, modifié – Remplacement de "un signal électrique" par "des tensions électriques" et de "signaux de pression" par "signaux de pression acoustique".]

3.9

récepteur à gradient de pression acoustique

transducteur de réception qui détecte le gradient de pression acoustique à l'aide de deux **hydrophones** ou plus séparés par des distances qui sont petites par rapport à la longueur d'onde

3.10

réponse directionnelle

<d'un **canal de récepteur vectoriel**> description de la réponse d'un canal de **récepteur vectoriel**, en fonction de la direction de propagation de l'onde acoustique plane incidente, dans une direction de canal donnée passant par le centre de référence, à une fréquence donnée

Note 1 à l'article: Le diagramme de **réponse directionnelle** est généralement présenté sous forme de graphique polaire à deux dimensions. L'échelle du diagramme polaire peut être graduée en niveaux de sensibilité ou en perte de déviation angulaire (voir Annexe A).

Note 2 à l'article: Le diagramme de **réponse directionnelle** du canal de **récepteur vectoriel** est une fonction cosinus, c'est-à-dire que le rapport entre la tension de sortie du canal de **récepteur vectoriel** dans la direction de l'angle θ et la tension de sortie maximale dans la direction axiale est égal à $|\cos \theta|$.

[SOURCE: IEC 60500:2017, 3.4, modifié – Dans la définition, remplacement de "hydrophone" par "canal de récepteur vectoriel", "un plan spécifié" par "une direction de canal donnée" et suppression de "généralement présentée sous forme de graphique".]

3.11

perte de déviation angulaire axiale

plus grande valeur de **réponse directionnelle** d'un canal de **récepteur vectoriel** sur l'axe principal moins une autre valeur de **réponse directionnelle** sur la direction symétrique

Note 1 à l'article: La **perte de déviation angulaire axiale** est exprimée comme un niveau en décibels, dB (voir Annexe A).

Note 2 à l'article: Parfois, la **perte de déviation angulaire axiale** est appelée asymétrie ou hétérogénéité maximale de la **réponse directionnelle** sur l'axe principal d'un canal de **récepteur vectoriel**.

3.12

perte de déviation angulaire latérale

plus grande valeur de **réponse directionnelle** d'un canal de **récepteur vectoriel** sur l'axe principal moins la plus petite valeur de **réponse directionnelle** sur l'axe latéral

Note 1 à l'article: La **perte de déviation angulaire latérale** est exprimée comme un niveau en décibels, dB (voir Annexe A).

3.13

sensibilité de déplacement de particule acoustique

$\underline{M}_\delta$

<d'un canal de **récepteur vectoriel**> quotient de la transformée de Fourier du signal de tension de sortie $\mathcal{F}(U_{VR}(t))$ d'un canal de **récepteur vectoriel** par la transformée de Fourier du signal de **déplacement de particule acoustique** $\mathcal{F}(\delta(t))$, pour une fréquence spécifiée et une direction spécifiée de l'incidence du son d'une onde plane sur la position du centre de référence du **récepteur vectoriel** dans le champ libre non perturbé si le **récepteur vectoriel** était retiré

$$\underline{M}_\delta = \frac{\mathcal{F}(U_{VR}(t))}{\mathcal{F}(\delta(t))} \quad (3)$$

Note 1 à l'article: La **sensibilité de déplacement de particule acoustique** d'un **récepteur vectoriel** est un paramètre à valeur complexe. La **sensibilité de déplacement de particule acoustique** calculée par cette équation va dans la direction de propagation de l'onde acoustique. Cette procédure d'étalonnage ne peut être effectuée que pour un seul canal aligné, et chaque canal du **récepteur vectoriel** est étalonné indépendamment.

Note 2 à l'article: Le module de la **sensibilité de déplacement de particule acoustique** est exprimé en unités de volt par mètre, $V \cdot m^{-1}$.

Note 3 à l'article: L'angle de phase de la **sensibilité de déplacement de particule acoustique** est exprimé en radians et représente la différence de phase entre la tension de sortie d'un **récepteur vectoriel** et le **déplacement de particule acoustique** (voir l'IEC 60500).

3.14

niveau de sensibilité de déplacement de particule acoustique

$L_{M,\delta}$

vingt fois le logarithme en base 10 entre le rapport du module de la **sensibilité de déplacement de particule acoustique** $|\underline{M}_\delta|$ d'un canal de **récepteur vectoriel** et une valeur de référence de la sensibilité, $M_{\delta,ref}$, en décibels

$$L_{M,\delta} = 20 \log_{10} \frac{|\underline{M}_\delta|}{M_{\delta,ref}} \text{ dB} \quad (4)$$

Note 1 à l'article: L'unité de **niveau de sensibilité de déplacement de particule acoustique** est exprimée comme un niveau en décibels, dB.

Note 2 à l'article: La valeur de référence de la sensibilité, $M_{\delta,ref}$, est $1 V \cdot pm^{-1}$.

3.15

sensibilité de vitesse de particule acoustique

$\underline{M}_u$

<d'un canal de **récepteur vectoriel**> quotient de la transformée de Fourier du signal de tension de sortie $\mathcal{F}(U_{VR}(t))$ d'un canal de **récepteur vectoriel** par la transformée de Fourier du signal de **vitesse de particule acoustique** $\mathcal{F}(u(t))$, pour une fréquence spécifiée et une direction

spécifiée de l'incidence du son d'une onde plane sur la position du centre de référence du **récepteur vectoriel** dans le champ libre non perturbé si le **récepteur vectoriel** était retiré

$$\underline{M}_u = \frac{\mathcal{F}(U_{VR}(t))}{\mathcal{F}(u(t))} \quad (5)$$

Note 1 à l'article: La **sensibilité de vitesse de particule acoustique** d'un **récepteur vectoriel** est un paramètre à valeur complexe. La **sensibilité de vitesse de particule acoustique** calculée par cette équation va dans la direction de propagation de l'onde acoustique. Cette procédure d'étalonnage ne peut être effectuée que pour un seul canal aligné, et chaque canal du **récepteur vectoriel** est étalonné indépendamment.

Note 2 à l'article: Le module de la **sensibilité de vitesse de particule acoustique** est exprimé en unités de volt secondes par mètre, $V \cdot s \cdot m^{-1}$.

Note 3 à l'article: L'angle de phase de la **sensibilité de vitesse de particule acoustique** est exprimé en radians et représente la différence de phase entre la tension de sortie d'un **récepteur vectoriel** et la **vitesse de particule acoustique** (voir l'IEC 60500).

3.16

niveau de sensibilité de vitesse de particule acoustique

$L_{M,u}$

vingt fois le logarithme en base 10 du rapport entre le module de la **sensibilité de vitesse de particule acoustique** $|\underline{M}_u|$ d'un canal de **récepteur vectoriel** et une valeur de référence de la sensibilité, $M_{u,ref}$, en décibels

$$L_{M,u} = 20 \log_{10} \frac{|\underline{M}_u|}{M_{u,ref}} \text{ dB} \quad (6)$$

Note 1 à l'article: L'unité de **niveau de sensibilité de vitesse de particule acoustique** est exprimée comme un niveau en décibels, dB.

Note 2 à l'article: La valeur de référence de la sensibilité, $M_{u,ref}$, est $1 V \cdot s \cdot nm^{-1}$.

3.17

sensibilité d'accélération de particule acoustique

$\underline{M}_a$

<d'un canal de **récepteur vectoriel**> quotient de la transformée de Fourier du signal de tension de sortie $\mathcal{F}(U_{VR}(t))$ d'un canal de **récepteur vectoriel** par la transformée de Fourier du signal d'**accélération de particule acoustique** $\mathcal{F}(a(t))$, pour une fréquence spécifiée et une direction spécifiée de l'incidence du son d'une onde plane sur la position du centre de référence du **récepteur vectoriel** dans le champ libre non perturbé si le **récepteur vectoriel** était retiré

$$\underline{M}_a = \frac{\mathcal{F}(U_{VR}(t))}{\mathcal{F}(a(t))} \quad (7)$$

Note 1 à l'article: La **sensibilité d'accélération de particule acoustique** d'un **récepteur vectoriel** est un paramètre à valeur complexe. La **sensibilité d'accélération de particule acoustique** calculée par cette équation va dans la direction de propagation de l'onde acoustique. Cette procédure d'étalonnage ne peut être effectuée que pour un seul canal aligné, et chaque canal du **récepteur vectoriel** est étalonné indépendamment.

Note 2 à l'article: Le module de la **sensibilité d'accélération de particule acoustique** est exprimé en unités de volt seconde au carré par mètre, $V \cdot s^2 \cdot m^{-1}$.

Note 3 à l'article: L'angle de phase de la **sensibilité d'accélération de particule acoustique** est exprimé en radians et représente la différence de phase entre la tension de sortie d'un **récepteur vectoriel** et l'**accélération de particule acoustique** (voir l'IEC 60500).

3.18

niveau de sensibilité d'accélération de particule acoustique

$L_{M,a}$

vingt fois le logarithme en base 10 du rapport entre le module de la **sensibilité d'accélération de particule acoustique** $|M_a|$ d'un canal de **récepteur vectoriel** et une valeur de référence de la sensibilité, $M_{a,ref}$, en décibels

$$L_{M,a} = 20 \log_{10} \frac{|M_a|}{M_{a,ref}} \text{ dB} \quad (8)$$

Note 1 à l'article: L'unité de **niveau de sensibilité d'accélération de particule acoustique** est exprimée comme un niveau en décibels, dB.

Note 2 à l'article: La valeur de référence de la sensibilité, $M_{a,ref}$, is $1 \text{ V} \cdot \text{s}^2 \cdot \mu\text{m}^{-1}$.

3.19

sensibilité de gradient de pression acoustique

M_{pg}

<d'un canal de **récepteur vectoriel**> quotient de la transformée de Fourier du signal de tension de sortie $\mathcal{F}(U_{VR}(t))$ d'un canal de **récepteur vectoriel** par la transformée de Fourier du signal de **gradient de pression acoustique** $\mathcal{F}(\nabla p(t))$, pour une fréquence spécifiée et une direction spécifiée de l'incidence du son d'une onde plane sur la position du centre de référence du **récepteur vectoriel** dans le champ libre non perturbé si le **récepteur vectoriel** était retiré

$$M_{pg} = \frac{\mathcal{F}(U_{VR}(t))}{\mathcal{F}(\nabla p(t))} \quad (9)$$

Note 1 à l'article: La **sensibilité de gradient de pression acoustique** d'un **récepteur vectoriel** est un paramètre à valeur complexe. La **sensibilité de gradient de pression acoustique** calculée par cette équation va dans la direction de propagation de l'onde acoustique. Cette procédure d'étalonnage ne peut être effectuée que pour un seul canal aligné, et chaque canal du **récepteur vectoriel** est étalonné indépendamment.

Note 2 à l'article: Le module de la **sensibilité de gradient de pression acoustique** est exprimé en unités de volt mètre par pascal, $\text{V} \cdot \text{m} \cdot \text{Pa}^{-1}$.

Note 3 à l'article: L'angle de phase de la **sensibilité de gradient de pression acoustique** est exprimé en radians et représente la différence de phase entre la tension de sortie d'un **récepteur vectoriel** et la **vitesse de particule acoustique** (voir l'IEC 60500).

3.20

niveau de sensibilité de gradient de pression acoustique

$L_{M,pg}$

vingt fois le logarithme en base 10 du rapport entre le module de la **sensibilité de gradient de pression acoustique** $|M_{pg}|$ d'un canal de **récepteur vectoriel** et une valeur de référence de la sensibilité, $M_{pg,ref}$, en décibels

$$L_{M,pg} = 20 \log_{10} \frac{|M_{pg}|}{M_{pg,ref}} \text{ dB} \quad (10)$$

Note 1 à l'article: L'unité de **niveau de sensibilité de gradient de pression acoustique** est exprimée comme un niveau en décibels, dB.

Note 2 à l'article: La valeur de référence de la sensibilité $M_{pg,ref}$ est $1 \text{ V} \cdot \text{m} \cdot \mu\text{Pa}^{-1}$.

3.21

guide d'ondes acoustiques

appareil pour la transmission guidée du son dans le cadre de limites prédéterminées

4 Liste de symboles

a	accélération d'une particule acoustique
a_0	accélération de la surface du projecteur
A	amplitude de la pression acoustique de l'onde se déplaçant dans la direction $+\hat{x}$ dans un tube à ondes progressives
B	amplitude de la pression acoustique de l'onde se déplaçant dans la direction $-\hat{x}$ dans un tube à ondes progressives
c	vitesse du son dans l'eau
c_f	vitesse du son en champ libre
c_t	vitesse du son dans un tube à ondes stationnaires
d_0	diamètre de récepteur vectoriel
D	diamètre intérieur d'un tube ou d'un guide d'ondes acoustiques
E	module de Young de la chambre du tube à ondes stationnaires
e_a	tension de sortie de l'accéléromètre de référence
E_0	module d'élasticité global de l'eau
f	fréquence acoustique
h_0	profondeur d'immersion de l' hydrophone dans l'eau
h	profondeur d'immersion du récepteur vectoriel dans l'eau
$\underline{I}_P$	courant électrique circulant dans le projecteur ²
$\underline{I}_T$	courant électrique circulant dans le transducteur
j	racine carrée de moins un
k	nombre d'onde acoustique, $k = 2\pi f / c$
K_i	coefficient de sensibilité de l'interféromètre optique
K_{a-w}	coefficient de conversion de la sensibilité dans l'air en sensibilité dans l'eau
L	longueur du guide d'ondes acoustiques dans un tube
$L_{M,a}$	niveau de sensibilité d'accélération de particule acoustique d'un récepteur vectoriel
$L_{M,pg}$	niveau de sensibilité de gradient de pression acoustique d'un récepteur vectoriel
L_p	niveau de sensibilité de pression acoustique d'un hydrophone
$L_{M,u}$	niveau de sensibilité de vitesse de particule acoustique d'un récepteur vectoriel
$L_{M,\delta}$	niveau de sensibilité de déplacement de particule acoustique d'un récepteur vectoriel
$\underline{M}_a$	sensibilité d'accélération de particule acoustique d'un récepteur vectoriel

² Le trait de soulignement dans le symbole de la grandeur signifie qu'il s'agit d'un paramètre à valeur complexe.

$\underline{M}_p$	sensibilité de pression acoustique d'un hydrophone
$\underline{M}_{pg}$	sensibilité de gradient de pression acoustique d'un récepteur vectoriel
$\underline{M}_u$	sensibilité de vitesse de particule acoustique d'un récepteur vectoriel
$\underline{M}_\delta$	sensibilité de déplacement de particule acoustique d'un récepteur vectoriel
$\underline{M}_0$	sensibilité de pression acoustique d'un hydrophone de référence
p_h	pression acoustique de profondeur h dans le tube à ondes stationnaires
p_i	pression acoustique observée par l' hydrophone de i th référence dans un tube à ondes progressives
∇p	gradient de pression acoustique
P_0	amplitude de pression acoustique dans un tube à ondes progressives
r	distance entre le projecteur et le récepteur
R	amplitude de coefficient de réflexion de l'impédance active dans un tube à ondes progressives
s_{ea}	sensibilité de l'accéléromètre de référence
S	surface
$\underline{S}$	matrice de transfert du tube à ondes progressives
$\underline{S}_{I,P}$	transmission de la réponse au courant d'un projecteur
$\underline{S}_{I,T}$	transmission de la réponse au courant d'un transducteur réciproque
t	temps
T	épaisseur de la chambre du tube à ondes stationnaires
U_i	tension de sortie en circuit ouvert de l' hydrophone de i th référence dans un tube à ondes progressives
U_O	tension de sortie de l'interféromètre optique
$U_{P,j}$	tension d'attaque fournie au projecteur acoustique j th dans un tube à ondes progressives
U_{VR}	tension de sortie d'un canal de récepteur vectoriel
U_0	tension de sortie de l' hydrophone de référence ou du couple d' hydrophones
u	vitesse de particule acoustique
x_i	coordonnée axiale de l' hydrophone de i th référence dans un tube à ondes progressives
$\underline{Z}_{PG}$	impédance électrique de transfert du projecteur et du récepteur vectoriel
$\underline{Z}_{TG}$	impédance électrique de transfert du transducteur et du récepteur vectoriel
$\underline{Z}_{PT}$	impédance électrique de transfert du projecteur et du transducteur
δ	déplacement de particule acoustique
ω	fréquence angulaire
λ	longueur d'onde du son dans l'eau
ρ	densité d'un milieu acoustique
ϕ_{PG}	angle de phase de l'impédance électrique de transfert du projecteur et du récepteur vectoriel
ϕ_{TG}	angle de phase de l'impédance électrique de transfert du transducteur réciproque et du récepteur vectoriel

ϕ_{PT} angle de phase de l'impédance électrique de transfert du projecteur et du transducteur réciproque

5 Relation entre les grandeurs vectorielles dans le champ acoustique

L'équation linéaire d'Euler valable pour les processus acoustiques de faible amplitude est la suivante:

$$\rho \frac{\partial \underline{u}}{\partial t} = -\nabla p \quad (11)$$

où $\underline{u}$ est la **vitesse de particule acoustique** dans l'onde acoustique, ρ est la densité du milieu, et ∇p est le **gradient de pression acoustique**. La **vitesse de particule acoustique** peut être calculée comme suit:

$$\underline{u} = -\frac{1}{\rho} \int \nabla p dt \quad (12)$$

La relation entre le **gradient de pression acoustique**, la **vitesse de particule acoustique**, le **déplacement de particule acoustique** et l'**accélération d'une particule acoustique** peut être calculée par les Formules (1), (2), (3), (5), (7), (9) et (12), et la relation entre leurs sensibilités peut être déterminée à partir de la **sensibilité de vitesse de particule acoustique** $\underline{M}_u$ comme suit [1], [5], [6]:

$$\begin{aligned} \underline{M}_a &= \frac{1}{j\omega} \underline{M}_u \\ \underline{M}_{pg} &= \frac{j}{\rho\omega} \underline{M}_u \\ \underline{M}_\delta &= j\omega \underline{M}_u \end{aligned} \quad (13)$$

6 Procédures générales d'étalonnage

6.1 Exigences générales d'étalonnage

6.1.1 Types d'étalonnages

Deux grands types d'étalonnages sont couverts dans le domaine d'application du présent document:

- l'étalonnage absolu sans relation avec un mesurage de même type.

L'étalonnage par réciprocité en champ libre et l'étalonnage par interférométrie optique sont décrits dans le présent document. L'étalonnage par réciprocité en champ libre est fondé sur le principe de réciprocité acoustique, la méthode exigeant trois transducteurs électroacoustiques, dont au moins un doit être un transducteur réciproque. L'étalonnage par interférométrie optique est fondé sur le mesurage de paramètres physiques, tels que la **vitesse de particule acoustique**, l'**accélération d'une particule acoustique** et le **déplacement de particule acoustique**, qui sont déterminés par le principe de mesure des vibrations laser et traçables par rapport à la longueur d'onde de la lumière laser. Les

éléments ci-dessus sont des méthodes d'étalonnage primaires, traçables par rapport aux normes électriques ou de longueur primaires, et capables d'atteindre une grande exactitude;

NOTE 1 S'agissant du **récepteur vectoriel inertiel**, il peut également être étalonné dans l'air par interférométrie optique (voir Annexe B).

- l'étalonnage relatif à l'aide d'un transducteur ou d'un accéléromètre de référence acoustique étalonné.

Les étalonnages sont réalisés par comparaison avec un autre transducteur ou accéléromètre acoustique qui a déjà été étalonné, par exemple par des méthodes absolues données dans l'IEC 60565-1:2020 [2] et l'IEC 60565-2:2019 [3]. L'exactitude de ce type d'étalonnage dépend généralement de l'incertitude d'étalonnage de l'accéléromètre ou du transducteur de référence.

NOTE 2 L'utilisation d'un **hydrophone** pour étalonner la **sensibilité d'accélération (de vitesse ou de déplacement) de particule acoustique** d'un **récepteur vectoriel** est probablement une méthode primaire, et leurs définitions sont fournies dans le document ISO/IEC Guide 99:2007 [7]. Toutefois, l'incertitude de l'étalonnage de l'**hydrophone** est plus grande que l'incertitude de l'étalonnage de l'accéléromètre (ou de la vitesse ou du déplacement). Pour cette raison, les étalonnages qui utilisent des **hydrophones** sont définis comme des étalonnages relatifs dans le présent document.

6.1.2 Exigences du champ acoustique

Pour que les étalonnages en champ libre soient valides, les exigences générales suivantes doivent être satisfaites:

- conditions de champ acoustique libre, exigeant une influence minimale des réflexions acoustiques provenant des limites du milieu (voir 5.2 de l'IEC 60565-1:2020);
- conditions de champ acoustique lointain, exigeant une distance de séparation suffisante entre la source et le récepteur (voir 5.3 de l'IEC 60565-1:2020);
- conditions en régime permanent acoustique, exigeant un comportement transitoire affiché par les transducteurs résonants comme ayant disparu (voir 5.4 de l'IEC 60565-1:2020).

Pour que les étalonnages de tube à ondes stationnaires soient valides, les exigences générales suivantes doivent être satisfaites:

- des conditions de champ à ondes stationnaires acoustiques, exigeant une conception rationnelle de la chambre d'étalonnage pour créer des ondes stationnaires acoustiques avec un rapport signal sur bruit suffisant dans le tube à paroi rigide, en particulier aux fréquences les plus basses (voir 6.2.1);
- des conditions de profondeur d'immersion, exigeant de produire l'onde stationnaire dans la chambre d'étalonnage (voir 6.2.2).

Pour que les étalonnages de tube à ondes progressives soient valides, les exigences générales suivantes doivent être satisfaites:

- des conditions de rapport signal sur bruit acoustique, exigeant un rapport signal sur bruit suffisamment élevé dans le **guide d'ondes acoustiques** du tube à ondes progressives, en particulier aux fréquences les plus basses (voir 6.3.1);
- des conditions de champ acoustique à ondes progressives acoustiques, exigeant une conception rationnelle du tube d'étalonnage pour créer une onde acoustique progressive plane unidirectionnelle, et exigeant une rigidité de la paroi du tube à ondes progressives par rapport au milieu acoustique (eau) (voir 6.3.2).

6.2 Exigences relatives au tube à ondes stationnaires acoustiques

6.2.1 Exigences relatives au tube à ondes stationnaires [8]

La structure de la chambre d'étalonnage d'un tube à ondes stationnaires verticales est représentée à la Figure 1. Elle est généralement en acier inoxydable avec une extrémité supérieure ouverte. Lorsque des signaux continus sont utilisés, un projecteur situé au fond de la chambre du tube vibre de manière sinusoïdale, et les signaux sonores sont projetés

verticalement vers la surface et réfléchis par l'interface eau-air supérieure pour créer le champ acoustique à ondes stationnaires dans le tube.

Le diamètre de la chambre doit être plus grand que l'anneau de montage et le **récepteur vectoriel** (voir la Figure 2) doit être immergé dans la chambre d'étalonnage avec une influence minimale sur le champ acoustique à ondes stationnaires. Pour produire une onde plane compressive dans le tube, le diamètre doit être inférieur à un tiers de la longueur d'onde. La paroi de la chambre d'étalonnage est rigide par rapport au milieu (eau) à l'intérieur de la chambre.

Pour créer le champ acoustique à ondes stationnaires, la relation entre le diamètre intérieur D et l'épaisseur T de la chambre d'étalonnage en acier inoxydable d'un tube à ondes stationnaires verticales doit satisfaire à l'exigence suivante:

$$\frac{2T}{D} \geq 0,4$$

Pour l'étalonnage d'un tube à ondes stationnaires, la répartition sonore à la profondeur donnée du tube doit être homogène, et son écart doit être inférieur à 0,7 dB.

Pendant l'étalonnage, le rapport signal sur bruit doit être supérieur à 20 dB, et l'utilisation d'un transducteur électrodynamique (ou à bobine mobile), et non un transducteur piézoélectrique, est recommandée aux fréquences les plus basses.

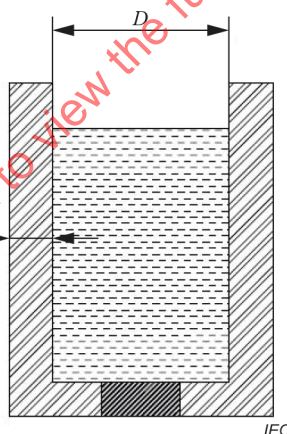


Figure 1 – Structure de la chambre d'étalonnage

6.2.2 Exigences relatives à la profondeur d'immersion des transducteurs

Pour l'étalonnage, un **récepteur vectoriel** (et un **hydrophone** de référence) sont immergés dans un tube à ondes stationnaires verticales jusqu'à une profondeur h sous l'eau (qui doit être mesurée avec une incertitude inférieure à 2 %), avec une excitation sinusoïdale de la chambre d'étalonnage.

Au sommet du tube à ondes stationnaires, la surface de l'air et de l'eau est une limite de libération de la pression, où la relation entre la vitesse des particules et la pression acoustique peut être calculée comme suit

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial h} \Big|_{h=0} &= 0 \\ p \Big|_{h=0} &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

La tension de sortie du canal de **récepteur vectoriel** à étalonner est l'expression de la fonction cosinus du produit du nombre d'onde acoustique k et de la profondeur d'immersion h . Lorsque le produit $kh = 0,5(n + 1) \pi$ ($n = 0, 2, 4, \dots$), la tension de sortie du canal du récepteur est égale à zéro.

Lorsqu'un **hydrophone** de référence est utilisé, sa tension en circuit ouvert est l'expression de la fonction sinusoïdale du produit du nombre d'onde acoustique k et de la profondeur d'immersion h . Lorsque le produit $kh = n\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), la tension de sortie en circuit ouvert de l'**hydrophone** de référence est aussi égale à zéro.

Pour éviter ces cas, la profondeur h du **récepteur vectoriel** et h_0 de l'**hydrophone** de référence immergés dans le tube à ondes stationnaires verticales doit être immergée bien loin des positions ci-dessus.

Le nombre d'onde acoustique k est déterminé par la fréquence acoustique f et la vitesse du son c_t dans l'eau dans le tube à ondes stationnaires. Lorsque la valeur maximale de la pression acoustique se trouve à la profondeur d'immersion de $h_{\max}$, et $h_{\max}$ se trouve à la position d'un quart de longueur d'onde de l'onde acoustique, alors, la vitesse du son peut être calculée par:

$$c_t = 4h_{\max}f$$

Aux basses fréquences, la longueur d'onde de l'onde acoustique est si grande que la vitesse du son est difficile à mesurer dans la longueur limitée de la chambre d'étalonnage. Généralement, la vitesse du son est mesurée à une fréquence relativement élevée, et sa valeur peut être appliquée dans toute la plage de fréquences concernée. L'incertitude de mesure doit prendre en considération l'erreur d'estimation de la vitesse du son.

La vitesse du son dans la chambre d'étalonnage peut également être calculée comme suit:

$$c_t = \frac{c_f}{\sqrt{1 + \frac{2E_0}{E} \cdot \frac{D}{2T}}}$$

où c_f est la vitesse du son du milieu dans un champ acoustique libre, E est le module de Young de la chambre, E_0 est le module d'élasticité global de la chambre, T est l'épaisseur de la chambre.

6.3 Exigences relatives au tube à ondes progressives acoustiques

6.3.1 Exigences relatives au signal d'entraînement

Les signaux utilisés pendant l'établissement du champ d'ondes progressives planes et pendant les étalonnages du **récepteur vectoriel** doivent être continus et harmoniques dans le temps.

Le rapport signal sur bruit des signaux continus et harmoniques dans le temps utilisés pour l'étalonnage des **récepteurs vectoriels** doit être supérieur à 20 dB.

NOTE Le tube à ondes progressives inclut les méthodes qui permettent de réduire le plus possible la transmission des vibrations du sol au **guide d'ondes acoustiques**.

6.3.2 Exigences relatives au tube à ondes progressives

Le tube à ondes progressives doit produire des ondes acoustiques progressives planes unidirectionnelles à l'intérieur d'un **guide d'ondes acoustiques** rempli de fluide. Le diamètre du **guide d'ondes acoustiques** doit être suffisamment petit pour que les modes normaux acoustiques radiaux et azimutaux ne soient pas pris en charge. Cette condition est satisfaite lorsque $kD/2 \ll 1$ où D est le diamètre du **guide d'ondes acoustiques** et k est le nombre d'onde acoustique. Le tube à ondes progressives doit être construit de telle sorte que les parois soient rigides par rapport au milieu acoustique.

Le tube peut être orienté à la verticale, à l'horizontale ou selon tout autre angle qui convient au laboratoire. Il convient d'inclure un système de rails internes ou toute autre méthode pour l'installation de **récepteurs vectoriels** à étalonner sur l'axe longitudinal du **guide d'ondes acoustiques**.

Le tube à ondes progressives peut fournir une méthode pour contrôler la température et/ou la pression hydrostatique du milieu acoustique à l'intérieur du **guide d'ondes acoustiques**. Il convient de prévoir une méthode d'évacuation de l'air du **guide d'ondes acoustiques**.

Il convient de mesurer la vitesse du son et la densité du milieu. Le milieu acoustique dans un tube à ondes progressives comprend des additifs pour empêcher la congélation du milieu à basse température.

6.4 Exigences relatives au matériel

6.4.1 Installation d'étalonnage

L'installation d'étalonnage utilisée doit permettre de satisfaire aux exigences acoustiques spécifiées en 6.1.2 sur la plage souhaitée de fréquences acoustiques et pour les types de **récepteurs vectoriels** en essai.

L'installation d'étalonnage en champ libre doit permettre de placer de manière reproductible au moins deux transducteurs en même temps à une distance de séparation connue et de les aligner pour l'étalonnage selon les exigences du 6.1.2.

NOTE 1 Le type d'installation d'étalonnage en champ libre le plus souvent rencontré est une cuve d'essai en béton, en acier ou en bois remplie d'eau (donnant lieu à la cuve réverbérée du fait des limites de réflexion) avec ou sans matériau anéchoïque. Ce type d'installation assure un accès pratique, un positionnement précis des dispositifs (à l'aide d'un cadre support rigide ou d'un système de positionnement) et un contrôle des conditions d'environnement. Toutefois, la dimension finie de la cuve d'essai limite la plage de fréquences à étalonner, sauf si des techniques élaborées de traitement des signaux sont utilisées.

L'installation avec tube à ondes stationnaires doit permettre d'immerger un **récepteur vectoriel** et/ou un **hydrophone** dans le tube à ondes stationnaires à une profondeur définie et de le fixer pour étalonnage conformément aux exigences du 6.2.2.

NOTE 2 L'installation d'étalonnage dans un tube à ondes stationnaires comprend deux types de tubes: un tube à ondes stationnaires verticales et un tube à ondes stationnaires horizontales, généralement en acier inoxydable. Le tube à ondes stationnaires verticales est un tube cylindrique dont l'extrémité supérieure est ouverte et qui est équipé d'un projecteur au fond du tube pour créer le champ acoustique des ondes stationnaires verticales. Le tube à ondes stationnaires horizontales est un tube cylindrique avec un trou ouvert pour l'installation des transducteurs et deux extrémités équipées de projecteurs pour former le champ acoustique des ondes stationnaires horizontales.

6.4.2 Instruments

6.4.2.1 Généralités

Les instruments de mesure suivants sont exigés pour procéder à l'étalonnage d'un **récepteur vectoriel**. Tous doivent présenter des performances qui couvrent la plage de fréquences

acoustiques souhaitée pour les étalonnages (il s'agit d'une plage de fréquences de 5 Hz à 10 kHz au maximum, mais elle peut être plus étroite en fonction de l'application).

6.4.2.2 Source du signal

La source doit être utilisée pour fournir le signal électrique aux projecteurs d'entraînement, ainsi que pour fournir le déclencheur qui permet de synchroniser l'acquisition du signal par le numériseur.

NOTE En règle générale, la source du signal fournit une sortie maximale de seulement quelques volts, mais fournit une plage de types de signaux, y compris les impulsions à déclenchement périodique d'une seule fréquence.

6.4.2.3 Amplificateur de puissance

L'amplificateur sert à alimenter le transducteur avec une puissance électrique suffisante pour générer des signaux d'ondes acoustiques au niveau du **récepteur vectoriel** au moins 20 dB supérieur au bruit ambiant dans l'installation.

NOTE 1 En règle générale, un amplificateur de puissance capable de générer une puissance de sortie de 100 W est suffisant pour les besoins d'étalonnage de la plupart des **récepteurs vectoriels**, mais des performances de puissance plus élevées sont exigées pour des applications spécialisées.

NOTE 2 En règle générale, l'amplificateur de puissance présente une faible impédance de sortie électrique (mais peut en variante présenter une impédance électrique de sortie qui correspond à celle du transducteur pour une puissance de sortie maximale).

6.4.2.4 Appareil de mesure du courant

Cet appareil doit être utilisé lorsque le courant électrique d'attaque qui traverse le projecteur est mesuré (lors d'un étalonnage par réciprocité en champ libre, par exemple). Il convient qu'il comprenne un transformateur de courant étalonné qui fournit une tension de sortie proportionnelle au courant électrique (la tension est alors mesurée par le numériseur avec la tension de sortie du **récepteur vectoriel** ou la tension en circuit ouvert de l'**hydrophone**).

NOTE En variante, une impédance (par exemple, résistance ou condensateur) et un voltmètre étalonnés peuvent être utilisés.

6.4.2.5 Préamplificateur

Pour les capteurs passifs, un préamplificateur est exigé pour amplifier la tension électrique de sortie du **récepteur vectoriel** ou de l'**hydrophone**. Le préamplificateur doit avoir une impédance d'entrée électrique supérieure à l'impédance de sortie du **récepteur vectoriel** ou de l'**hydrophone** par un facteur d'au moins 100.

NOTE 1 En règle générale, le préamplificateur présente un gain de tension sélectionnable et un filtrage électronique également sélectionnable (en variante, le filtrage peut être assuré à l'aide d'une unité réservée séparée ou obtenue de façon numérique dans le post-traitement).

NOTE 2 En général, un **récepteur vectoriel** possède un préamplificateur intégré, comme pour un **hydrophone**, auquel cas un préamplificateur séparé n'est pas nécessaire.

6.4.2.6 Filtre

Lorsque le bruit hors bande interfère avec le mesurage, un filtre peut être utilisé sur la tension électrique de sortie du **récepteur vectoriel** ou de l'**hydrophone** après amplification par le préamplificateur.

NOTE 1 Lorsque le rapport signal sur bruit est faible ou que le bruit hors bande interfère avec le mesurage, le filtre peut être utilisé pour améliorer la qualité des signaux.

NOTE 2 Le filtre peut être conçu en tant que passe-haut, passe-bas ou passe-bande, avec différentes pentes d'atténuation hors bande telles que 12 dB/oct, 24 dB/oct et 48 dB/oct, et le filtre passe-bande est couramment utilisé.

NOTE 3 Dans le cas où un filtre analogique n'est pas disponible, un filtre numérique peut être utilisé à la place.

6.4.2.7 Numériseur

Le numériseur utilisé doit être un convertisseur analogique/numérique (CAN) ou un oscilloscope de numérisation, qui capture un enregistrement numérique des signaux électriques pendant l'étalonnage (par exemple, tension de sortie du canal du **récepteur vectoriel**, tension provenant du transformateur de courant, etc.).

La fréquence d'échantillonnage du numériseur doit être égale à au moins deux fois et demie la fréquence maximale concernée, et la résolution doit être suffisante pour un enregistrement exact du signal sans erreur de quantification pour le rapport signal sur bruit applicable, avec une résolution minimale recommandée de 8 bits. Le numériseur doit pouvoir être déclenché en externe (généralement par la source du signal ou l'ordinateur). Lors des mesurages électriques absolus, le numériseur doit être étalonné sur la plage de fonctionnement.

6.4.2.8 Interféromètre optique

L'interféromètre optique doit être utilisé pour mesurer le mouvement de la pellicule pour l'étalonnage en champ libre et la surface de l'eau pour l'étalonnage du tube à ondes stationnaires. Dans la plage de fréquences d'étalonnage, l'interféromètre optique doit avoir une réponse en fréquence stable de la sensibilité. La plage dynamique de l'interféromètre optique doit être de 100 dB ou plus afin d'obtenir le mesurage exact de la **vitesse de particule acoustique**.

NOTE La tension de sortie de l'interféromètre optique peut avoir plusieurs échelles pour le mesurage du mouvement dans différentes situations afin d'obtenir une bonne forme d'onde pour l'affichage et l'acquisition.

6.4.2.9 Régulateur informatique

L'étalonnage doit être contrôlé par un ordinateur sur lequel est installé le logiciel d'acquisition approprié qui contrôle le numériseur et l'acquisition des signaux et qui peut également fournir le déclencheur pour la source du signal.

NOTE 1 Le logiciel est généralement utilisé pour procéder à l'analyse exigée du signal, y compris à la détermination de la fenêtre de temps et au calcul de l'amplitude des signaux enregistrés. Toutefois, certaines de ces fonctions peuvent être réalisées à l'aide des fonctions de traitement embarquées disponibles sur un oscilloscope de numérisation.

NOTE 2 Même si certaines des tâches de mesure ci-dessus peuvent être réalisées manuellement (à l'aide d'un oscilloscope analogique, par exemple), cette pratique est déconseillée.

6.4.2.10 Projecteur

Un certain nombre de transducteurs sont exigés pour servir de projecteurs pendant les étalonnages. Par exemple, l'étalonnage en champ libre par réciprocité à trois transducteurs exige au moins deux transducteurs en plus du dispositif en essai (voir 9.1), et l'étalonnage par comparaison avec utilisation d'un **hydrophone** de référence étalonné exige un projecteur auxiliaire destiné à être utilisé pour générer un champ acoustique libre approprié (voir 9.3).

Aux basses fréquences, l'étalonnage à l'aide d'un accéléromètre de référence placé dans un tube à ondes stationnaires verticales exige un transducteur utilisé comme projecteur au fond du tube en plus du dispositif en essai (voir 10.1), et l'étalonnage par comparaison avec utilisation d'un **hydrophone** de référence étalonné exige un projecteur destiné à être utilisé pour générer un champ acoustique d'ondes stationnaires approprié (voir 10.2).

NOTE Un certain nombre de transducteurs différents sont utilisés pour couvrir une large plage de fréquences. (cela est particulièrement vrai pour les projecteurs dont la plage de fréquences est limitée en raison de leur comportement résonant inhérent).

6.4.2.11 Hydrophone de référence

Hydrophone stable et étalonné par une méthode d'étalonnage absolue avec de faibles incertitudes de mesure, comme la méthode par réciprocité en champ libre, la méthode de la colonne vibrante et la méthode du coupleur acoustique, etc. Il peut être utilisé pour l'étalonnage des **récepteurs vectoriels** par une méthode d'étalonnage relative.

6.4.2.12 Accéléromètre de référence

Accéléromètre stable et étalonné par une méthode d'étalonnage absolue avec de faibles incertitudes de mesure. Il peut être utilisé pour le mesurage de l'accélération à la surface du projecteur au fond de la chambre du tube.

6.5 Positionnement et alignement

6.5.1 Système de coordonnées

Le système de coordonnées angulaires choisi doit être celui spécifié par l'IEC 60500:2017.

6.5.2 Direction de référence

Avant l'étalonnage, une direction de référence doit être définie pour chaque transducteur. Sauf raison valable, la direction de référence doit être choisie de manière à coïncider avec l'axe principal des transducteurs, comme cela est défini dans l'IEC 60500:2017.

NOTE Pour le **récepteur vectoriel**, il peut y avoir une, deux ou trois directions de référence orthogonales.

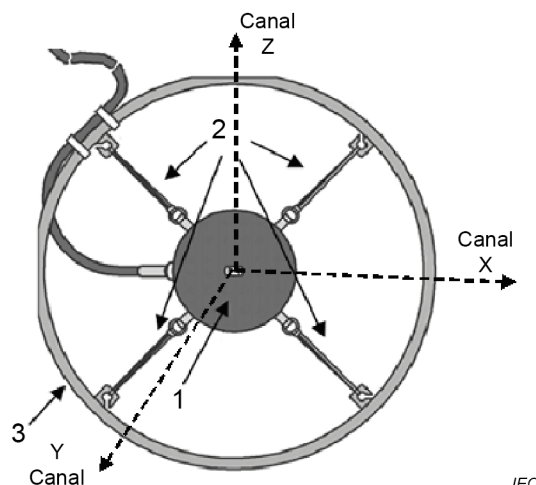
6.5.3 Montage et support du transducteur

Lorsque le montage semble avoir un impact sur la sensibilité mesurée, le **récepteur vectoriel** doit être étalonné dans le même montage utilisé lors du déploiement du dispositif pour les mesurages réalisés sur le terrain. Lorsque le dispositif est considéré comme sensible au type de support ou montage, une description du dispositif de montage doit être mentionnée avec les résultats.

Chaque projecteur et chaque **hydrophone** doivent être solidement fixés à un montage et à un support qui permettent de placer les dispositifs avec exactitude et de manière reproductible en des points fixes dans l'eau. Le même principe s'applique également pour le montage et support du **récepteur à gradient de pression acoustique**.

Pour le **récepteur vectoriel inertiel**, le récepteur doit être suspendu à un support d'étalonnage (tel qu'un anneau de montage) à l'aide de matériaux élastiques (tels que du caoutchouc) (voir la Figure 2), et le support d'étalonnage doit être solidement fixé à un montage de support [4], [9].

Le montage de support des transducteurs doit être choisi de manière à avoir un impact minimal sur la sensibilité mesurée, pour autant que l'exigence ci-dessus soit satisfaite quant au positionnement précis des transducteurs.



Légende

- 1 récepteur vectoriel tridimensionnel
- 2 caoutchouc
- 3 anneau de montage

Figure 2 – Récepteur vectoriel co-vibrant suspendu à un anneau de montage

Lorsqu'une platine rotative est intégrée dans le cadre du support ou le système de positionnement, le montage doit permettre de positionner un transducteur en plaçant son centre de référence le long de l'axe de rotation.

NOTE 1 La taille de l'anneau de montage utilisé pour la suspension est plus grande que celle du **récepteur vectoriel** afin de réduire le plus possible son influence sur les vibrations du **récepteur vectoriel**.

NOTE 2 D'autres méthodes de suspension du **récepteur vectoriel inertiel** peuvent également être utilisées. Il est important que la fréquence résonante du système de suspension (y compris l'anneau de montage, le matériau élastique et le **récepteur vectoriel inertiel**) soit inférieure à la plage de fréquences concernée (d'au moins une octave).

NOTE 3 Certains transducteurs sont plus sensibles que d'autres à l'influence de la méthode de montage. Pour éviter l'influence du montage, il est recommandé d'éviter les supports remplis d'air ou les mâts. Dans la mesure du possible, il est recommandé d'utiliser des supports à irrigation par ruissellement naturel tels que les mâts creux en fibre de carbone ou en plastique.

NOTE 4 Des précautions peuvent également être prises pour réduire le plus possible la quantité de bruit transmis par la structure et qui peut être probablement recueillie par le montage et le cadre de support, puis transmise aux transducteurs.

6.5.4 Alignement

Avant chaque mesurage acoustique lors de l'étalonnage en champ libre, le couple de transducteurs concerné (un projecteur et un **récepteur vectoriel**, par exemple) doit être positionné à la même profondeur d'eau et être orienté de manière à aligner les directions de référence des transducteurs.

Pendant l'étalonnage du tube à ondes stationnaires, la direction de référence est la direction axiale de la chambre d'étalonnage. Pour le **récepteur vectoriel** symétrique à étalonner, sa direction de référence doit être orientée verticalement par rapport au projecteur situé au fond de la chambre d'étalonnage.

NOTE 1 Cet alignement peut être réalisé mécaniquement à l'aide de mâts de montage ou d'un assemblage particuliers, ou à l'aide d'un système de positionnement automatisé (composé, par exemple, de moteurs pas-à-pas et de régulateurs).

NOTE 2 Noter que les longueurs des mâts de montage par rapport au centre de référence du **récepteur vectoriel** ou de l'**hydrophone** sont soigneusement mesurées de manière à pouvoir être immergées précisément à la même profondeur.

NOTE 3 Les transducteurs qui présentent une directivité significative autour de leur axe principal peuvent être alignés acoustiquement par la recherche du signal reçu maximal à une fréquence spécifique. La direction de référence est parfois choisie selon un angle du diagramme de **réponse directionnelle** dans lequel la réponse ne varie pas de façon significative avec l'angle directionnel, pour une fréquence spécifique. Noter que lorsqu'une direction de référence est choisie de cette manière, la même direction est alors choisie pour toutes les fréquences.

NOTE 4 Pour l'alignement acoustique entre deux transducteurs (par la recherche du signal reçu maximal à une fréquence spécifique), au moins deux degrés de liberté sont utilisés pour chaque montage de transducteur: un déplacement vertical dans l'eau pour pouvoir modifier la profondeur du transducteur, et la rotation autour de l'axe vertical qui passe par le centre de référence du transducteur à l'aide d'une platine rotative intégrée dans le cadre du support ou le système de positionnement.

6.6 Représentation de la réponse en fréquence

Le nombre de fréquences acoustiques choisi pour l'étalonnage doit assurer que les performances du **récepteur vectoriel** sont bien caractérisées sur la plage de fréquences souhaitée.

6.7 Limites de fréquence

6.7.1 Limite de haute fréquence

Pour l'étalonnage en champ libre, la limite principale aux hautes fréquences est la fréquence de fonctionnement d'un **récepteur vectoriel**. Actuellement, la fréquence acoustique maximale d'un **récepteur vectoriel** idéal est de 10 kHz environ. Elle est toutefois diminuée en raison de la résonance de l'enveloppe dans le cas d'une conception inappropriée.

Pour l'étalonnage du tube à ondes stationnaires, la limite principale aux hautes fréquences est le diamètre de la chambre du tube, qui doit être inférieur à un quart de la longueur d'onde de la fréquence acoustique maximale. De plus, la taille de l'anneau de montage doit être suffisamment petite pour réduire le plus possible l'influence sur le champ d'ondes acoustiques.

Pour les étalonnages du tube à ondes progressives, la limite principale aux hautes fréquences est déterminée par le diamètre du **guide d'ondes acoustiques**. Lorsque le diamètre est supérieur à environ un tiers d'une longueur d'onde, le champ acoustique n'est plus uniforme dans un plan transversal [1].

NOTE La méthode ne peut pas être utilisée à des fréquences supérieures à la limite supérieure de fréquence, qui est imposée par les modes acoustiques radiaux ou azimutaux qui peuvent apparaître lorsque le diamètre du **guide d'ondes acoustiques** n'est pas petit par rapport à une longueur d'onde acoustique. Les modes acoustiques radiaux et azimutaux provoquent des gradients de pression acoustique dans le plan orthogonal à l'axe du **guide d'ondes acoustiques**, de sorte que le niveau de sortie du **récepteur vectoriel** et des **hydrophones** de référence dépend de leurs positions radiale et azimutale dans le **guide d'ondes acoustiques**.

6.7.2 Limite de basse fréquence

Pour l'étalonnage en champ libre, les limites principales aux basses fréquences sont le facteur de qualité du projecteur et le temps sans écho de la cuve d'essai. Pour la plupart des installations de cuves d'essai d'une dimension minimale de cinq mètres ou plus, la limite pratique de basse fréquence pour l'étalonnage des **hydrophones** est proche de 1 kHz (voir l'Annexe E de l'IEC 60565-1:2020). En outre, le niveau des signaux d'ondes acoustiques produit par le projecteur est réduit à mesure que la fréquence est abaissée, le rapport signal sur bruit chutant finalement à une valeur inférieure à 20 dB, ce qui limite la fréquence minimale pour les étalonnages.

NOTE 1 Pour les signaux continus dans les cuves anéchoïques, les performances du revêtement anéchoïque se dégradent aux basses fréquences, ce qui limite la possibilité d'obtenir des conditions en champ libre.

NOTE 2 La limite de basse fréquence pour l'étalonnage en champ libre dans les cuves réverbérées peut être étendue à l'aide de techniques élaborées de traitement des signaux [10], [11], [12], [13], [15].

Pour l'étalonnage du tube à ondes stationnaires, la limite principale aux basses fréquences est le faible rapport signal sur bruit, c'est-à-dire que le projecteur au fond de la chambre du tube ne peut pas transmettre le signal suffisamment important pour atteindre le rapport signal sur bruit de 20 dB.

Pour l'étalonnage du tube à ondes progressives, la limite principale aux basses fréquences est déterminée par l'espacement et la distance échantillonnés par les **hydrophones** de référence et le rapport signal sur bruit à l'intérieur du **guide d'ondes acoustiques**.

NOTE 3 La méthode ne peut pas être utilisée à des fréquences inférieures à la limite de basse fréquence, qui est imposée soit par la perte de la sensibilité de transmission des projecteurs acoustiques et la réduction proportionnelle du rapport signal sur bruit à l'intérieur du **guide d'ondes acoustiques**, soit par l'impossibilité de résoudre le gradient de phase sur la longueur couverte par les **hydrophones** de référence en raison des incertitudes sur les déplacements axiaux x_i ou les réponses en phase des **hydrophones** de référence.

6.8 Contrôles des interférences acoustiques

Pour les étalonnages en champ acoustique libre qui utilisent des signaux à salves d'impulsions, une fréquence de répétition à salves d'impulsions doit être choisie de manière à ce que toute la réverbération dans la cuve s'atténue pour devenir inférieure au signal direct d'au moins 40 dB avant la transmission de la prochaine impulsion. Avec des signaux continus dans un tube à ondes stationnaires, la durée des signaux doit être suffisamment longue pour produire une onde stationnaire. Le niveau d'interférence par rapport aux signaux acoustiques doit être au moins inférieur de 30 dB au niveau du signal.

NOTE 1 D'autres informations relatives à l'influence des réflexions sont données à l'Annexe E de l'IEC 60565-1:2020.

NOTE 2 Lorsque des ondulations périodiques lisses peuvent être observées sur un tracé de l'impédance électrique de transfert (ou de la sensibilité) en fonction de la fréquence, il s'agit d'une indication selon laquelle des réflexions acoustiques sont susceptibles d'être présentes, entraînant des effets d'interférence constructifs et destructifs. Lorsque l'intervalle de fréquence entre des crêtes successives dans le tracé est Δf et c est la vitesse du son dans le milieu, la différence de trajet Δd entre les signaux directs et réfléchis qui arrivent au niveau du transducteur de réception peut être calculée par $\Delta d = c/\Delta f$.

NOTE 3 Les oscillations provoquées par un signal acoustique réfléchi avec une différence de trajet peuvent être éliminées par des techniques élaborées de traitement des signaux, telles que la méthode CMWA, la méthode de modélisation du signal, la méthode FDFP et la méthode TDS [10], [11], [12], [13], [15].

7 Mesurages électriques

7.1 Forme du signal

Le signal électrique par défaut utilisé lors de l'étalonnage est à ondes entretenues (sinusoïdal) ou à salves d'impulsions (ondes sinusoïdales déclenchées).

Quelle que soit la forme du signal choisie, les exigences du 6.1.2 s'appliquent toujours. Noter que les exigences relatives à l'obtention d'un champ acoustique libre varient en fonction de la forme du signal utilisée.

NOTE D'autres formes de signal sont possibles (les courtes impulsions à large bande ou les porteuses pulsées à fréquence glissante modulées en fréquence, par exemple). Les techniques d'analyse de ce type de signaux peuvent être utilisées pour déterminer l'amplitude (et la phase) du signal en fonction de la fréquence. Lorsque le signal est analysé par une transformée de Fourier, la résolution en fréquence dépend de la longueur d'enregistrement du signal.

7.2 Mise à la terre électrique

Afin d'éviter les boucles de terre, les bornes électriques des transducteurs ne doivent pas être en contact avec l'eau. Les parties métalliques exposées d'un **récepteur vectoriel** ou d'un **hydrophone** doivent être les seules connexions à la terre pour l'écran du câble du transducteur et pour le préamplificateur du transducteur. Tous les autres contacts à la terre doivent être exclus.

7.3 Mesurage de la tension de sortie du transducteur

7.3.1 Généralités

La tension de sortie de l'**hydrophone** et du **récepteur vectoriel** doit être mesurée à l'extrémité du câble. Les bornes électriques choisies doivent être spécifiées (voir l'IEC 60500:2017).

Pour les signaux à salves d'impulsions, la forme d'onde en tension de l'**hydrophone** et du **récepteur vectoriel** doit être numérisée, par exemple à l'aide d'un oscilloscope de numérisation ou d'un convertisseur analogique-numérique informatisé.

Pour un signal à ondes entretenues, le mesurage doit être effectué à l'aide d'un voltmètre d'impédance d'entrée électrique élevée, d'un oscilloscope de numérisation ou d'un convertisseur analogique-numérique informatisé.

Lorsqu'un amplificateur, un atténuateur ou un filtre est utilisé avec le voltmètre ou le numériseur pour former un canal de mesure absolue, ces éléments doivent être étalonnés. Toutefois, un étalonnage est inutile lorsque le même canal de mesure est utilisé uniquement pour mesurer les rapports des tensions, même si, dans ce cas, la linéarité de ce canal doit toujours être déterminée.

Lors du mesurage des rapports des tensions, les deux tensions doivent être exprimées dans la même métrique (par exemple, tensions crêtes ou tensions efficaces).

7.3.2 Analyse du signal

Pour les signaux à salves d'impulsions, l'amplitude du signal (et, si cela est exigé, la phase du signal) doit être déterminée à partir de la forme d'onde en tension à fenêtre de temps du canal de **récepteur vectoriel** ou de l'**hydrophone**, la fenêtre de temps étant placée sur la partie en régime permanent du signal sans écho. Le début de la fenêtre de temps doit être placé sur la forme d'onde après que le projecteur a atteint un régime permanent, et la fin de la fenêtre doit être placée avant l'arrivée du premier signal réfléchi ou avant la fin du signal direct (selon ce qui se produit en premier). (voir l'Annexe E de l'IEC 60565-1:2020).

7.3.3 Charge électrique par les appareils de mesure

Au cours des mesurages, l'**hydrophone** ou le **récepteur vectoriel** sans préamplificateur intégré doit être connecté à un appareil de mesure à impédance d'entrée électrique élevée (préamplificateur, voltmètre, oscilloscope ou numériseur), de sorte que l'impédance d'entrée électrique soit bien supérieure à l'impédance électrique du **récepteur vectoriel** ou de l'**hydrophone** (dans l'idéal plus de 100 fois supérieure).

Lors du mesurage de l'angle de phase de la tension de sortie du transducteur de réception, l'impédance d'entrée électrique de l'appareil de mesure doit dans l'idéal être supérieure à plus de 1 000 fois l'impédance électrique du transducteur de réception.

Lorsque l'impédance électrique du transducteur de réception est élevée, il faut prendre en considération la charge électrique dudit transducteur par l'appareil de mesure. Dans ces cas, les corrections de la charge électrique doivent être appliquées à la tension mesurée, afin d'obtenir la tension en circuit ouvert (voir l'Annexe C de l'IEC 60565-1:2020).

7.3.4 Charge électrique par les câbles prolongateurs

Lorsqu'un câble prolongateur de longueur significative est relié à l'**hydrophone**, il applique une charge électrique sur l'**hydrophone** et des corrections doivent être appliquées afin d'obtenir la tension en circuit ouvert à l'extrémité du câble de l'**hydrophone** (voir l'Annexe C de l'IEC 60565-1:2020).

7.3.5 Bruit électrique

Le rapport signal sur bruit doit être suffisant pour pouvoir effectuer les mesurages sans perte significative d'exactitude. Il convient que les valeurs de pression acoustique mesurée soient supérieures d'au moins 20 dB à la pression de bruit de largeur de bande équivalente (voir l'IEC 60500:2017).

Le niveau de bruit parasite à large bande peut être réduit par l'utilisation d'un filtre passe-bande. Toutefois, la bande passante doit être suffisamment large pour laisser passer le signal sans déformation.

NOTE 1 Le niveau de bruit électrique dégrade l'exactitude des mesurages électriques. Le rapport signal sur bruit est susceptible de diminuer en cas d'utilisation de projecteurs à des fréquences bien inférieures à la résonance.

NOTE 2 En présence de bruit électrique, le rapport signal sur bruit peut être amélioré par l'établissement d'une moyenne cohérente des signaux répétés. Pour le bruit aléatoire, la moyenne de N signaux améliore le rapport signal sur bruit d'un facteur de $\sqrt{N}$ (racine carrée de N).

7.3.6 Diaphonie

En présence d'interférences cohérentes provenant de la diaphonie électrique, le moyennage des signaux et le filtrage à bande étroite n'entraînent pas en général une amélioration de l'exactitude. Par conséquent, dans ces cas, des efforts doivent être entrepris pour déterminer la cause du problème, et des mesures doivent être prises pour réduire le plus possible les effets par une mise à la terre électrique adaptée, par exemple, des câbles de commande du projecteur.

Dans le cas d'un signal à ondes entretenues, le niveau de diaphonie électrique doit être au moins inférieur de 40 dB au niveau du signal.

Lorsque la diaphonie est présente avec des signaux à salves d'impulsions, cela ne provoque des interférences que si la longueur de la salve est supérieure au temps de propagation acoustique. Lorsque la diaphonie ne peut pas être éliminée par une mise à la terre électrique adaptée, la longueur de la salve doit être réduite de sorte qu'il n'y ait pas de chevauchement dans le temps avec le signal acoustique.

7.3.7 Préamplificateurs intégrés

Généralement, un **récepteur vectoriel** comporte un préamplificateur intégré, et la sensibilité dudit **récepteur** doit être exprimée comme la sensibilité d'extrémité de câble (en incluant les performances du préamplificateur comme partie intégrante du dispositif). Ce principe vaut également pour l'**hydrophone** avec un préamplificateur intégré.

7.4 Mesurage du courant d'attaque du projecteur

7.4.1 Instruments

Le courant qui traverse le projecteur doit être déterminé par un transformateur de courant étalonné (qui produit une tension proportionnelle au courant d'attaque).

Pour les signaux à salves d'impulsions, la forme d'onde en tension du transformateur de courant doit être numérisée, par exemple à l'aide d'un oscilloscope de numérisation ou d'un convertisseur analogique-numérique informatisé.

Pour un signal à ondes entretenues, la tension du transformateur de courant doit être mesurée à l'aide d'un voltmètre d'impédance d'entrée électrique élevée, d'un oscilloscope de numérisation ou d'un convertisseur analogique-numérique informatisé.

Lorsqu'un amplificateur, un atténuateur et/ou un filtre sont utilisés avec le voltmètre ou le numériseur pour former un canal de mesure absolue, ces éléments doivent être étalonnés, sauf si le même canal de mesure est également utilisé uniquement pour mesurer le rapport des tensions.

NOTE Bien que le transformateur de courant soit l'appareil préférentiel, une autre méthode consiste à mesurer la chute de tension dans une résistance étalonnée de faible valeur (seulement quelques ohms) ou toute autre impédance étalonnée (condensateur, par exemple) connectée en série avec le projecteur.

7.4.2 Analyse du signal

Pour les signaux à salves d'impulsions, l'amplitude du signal (et, si cela est exigé, la phase du signal) doit être déterminée à partir de la forme d'onde en tension à fenêtre de temps du transformateur de courant, la fenêtre de temps étant placée sur la partie en régime permanent du signal sans écho. Le début et la fin de la fenêtre de temps doivent être placés sur la forme d'onde aux mêmes positions que celles choisies pour la tension du transducteur de réception (voir 7.3.2).

8 Préparation de mesure

8.1 Préparation des transducteurs

8.1.1 Trempage

Avant l'étalonnage, les transducteurs doivent être trempés pour permettre l'équilibrage de la température avec l'eau.

Lorsque la température de l'air dans lequel les transducteurs sont stockés et préparés est proche de celle de l'eau (comme pour une cuve d'essai en intérieur), la durée de trempage peut être réduite à quelques minutes. Toutefois, lorsque la température de l'eau est bien inférieure à la température ambiante du laboratoire (comme cela peut être le cas pour une installation en eau libre dans les conditions hivernales), une durée de trempage d'au moins 30 min est recommandée.

8.1.2 Mouillage

Un produit mouillant (un détergent doux, par exemple) qui réduit la tension superficielle de l'eau et empêche l'adhérence des bulles à la surface doit être appliqué sur toute la surface du transducteur pour atténuer l'effet des bulles de gaz ou de l'air emprisonné qui s'accrochent à sa surface, avant immersion dans l'eau. Après immersion, aucune partie sèche ne doit être visible lorsque le transducteur est rapidement retiré de l'eau.

NOTE Le processus de fixation des bulles d'air sur la surface du transducteur apparaît plus évident lorsque des transducteurs chauds sont plongés dans de l'eau froide, car des transducteurs plus chauds présentent un léger effet thermique avec l'eau plus froide avec laquelle leur surface entre en contact, ce qui provoque l'expulsion du gaz dissous de la solution (l'air étant moins soluble dans l'eau chaude que dans l'eau froide).

8.2 Conditions d'environnement (température et profondeur)

Lorsque la sensibilité d'un **récepteur vectoriel** est exigée pour des conditions particulières de température de l'eau et de profondeur d'immersion, le **récepteur vectoriel** doit:

- 1) être étalonné dans les mêmes conditions de température et de profondeur que celles dans lesquelles il est utilisé sur le terrain; ou:
- 2) avoir des valeurs de sensibilité corrigées en fonction des différentes conditions d'environnement, les corrections reposant sur des étalonnages précédents selon la température ou la profondeur ou étant apportées à l'aide de modèles analytiques validés.

NOTE 1 La sensibilité de certains **récepteurs vectoriels** peut varier avec la température ambiante et la profondeur d'immersion (due à une augmentation de la pression hydrostatique). Il est relativement rare de pouvoir procéder à un étalonnage dans une plage de valeurs de température et de profondeur, et des installations spécialisées sont utilisées.

NOTE 2 Les conditions d'environnement qui existent dans une installation de cuve d'essai en intérieur ne peuvent pas répliquer complètement les conditions océaniques (pour la température de l'eau ou la profondeur, par exemple). Les étalonnages sont parfaitement valides pour les conditions rencontrées pendant l'étalonnage uniquement. Lorsqu'une estimation des performances dans les conditions océaniques est exigée, il est important de corriger la sensibilité obtenue dans le cadre de l'étalonnage de la cuve (par ajout d'une composante d'incertitude adaptée pour refléter l'incertitude de la correction).

NOTE 3 Pour les mesurages réalisés dans des installations en eau libre, les conditions d'environnement (température de l'eau ou profondeur) ne peuvent pas être identiques à celles de l'application finale prévue. Lorsqu'une estimation des performances est exigée dans les conditions qui correspondent à l'application finale, il est important de corriger la sensibilité obtenue avec l'installation en eau libre (par ajout d'une composante d'incertitude adaptée pour refléter l'incertitude de la correction).

9 Étalonnage en champ libre

9.1 Étalonnage par réciprocité en champ libre

9.1.1 Généralités

Cette méthode décrit un étalonnage absolu par réciprocité en champ libre pour les **récepteurs vectoriels**. Sur la base du principe de réciprocité acoustique, trois transducteurs électroacoustiques doivent être utilisés, dont au moins un doit être un transducteur réciproque. La méthode peut être appliquée dans la plage de fréquences de 250 Hz à 10 kHz dans une cuve d'eau de laboratoire. Il s'agit d'une méthode d'étalonnage primaire du canal de réception des **récepteurs vectoriels** [4], [14], [16], [17], [18], [19], [20].

NOTE Généralement, pour obtenir la sensibilité en champ libre pour les fréquences inférieures à un ou deux kilohertz dans une cuve d'eau de laboratoire, des techniques élaborées de traitement des signaux peuvent être appliquées, telles que CMWA, FDFP, TDS, etc. [10], [11], [12], [13], [15].

9.1.2 Principe

Trois transducteurs sont utilisés pour l'étalonnage par réciprocité en champ libre. Pour des raisons pratiques, les transducteurs peuvent porter les étiquettes P (projecteur), G (**récepteur vectoriel**) et T (transducteur réciproque), et doivent être rassemblés en trois configurations de mesure, comme cela est présenté dans l'IEC 60565-1:2020.

La Figure 3 représente le cadre de mesure pour l'étalonnage par réciprocité en champ libre du **récepteur vectoriel**. Pour chaque configuration de mesure, le couple de transducteurs doit être déployé dans l'eau et séparé selon une distance connue, leurs axes étant alignés l'un avec l'autre.

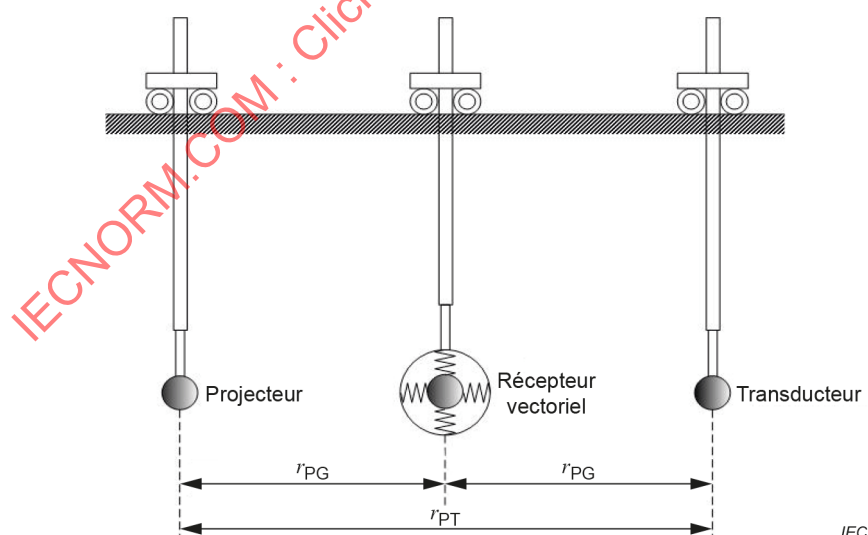


Figure 3 – Cadre de mesure pour l'étalonnage par réciprocité en champ libre du récepteur vectoriel

Pour toutes les configurations, les exigences relatives aux conditions de champ acoustique libre, aux conditions de champ lointain et aux conditions de régime permanent doivent être satisfaites. L'impédance électrique de transfert de chaque couple de transducteurs doit être déterminée au nombre souhaité de fréquences dans toute la plage de fréquences concernée.

Soit un signal de courant $I_P(t)$ circulant à travers un projecteur P avec une réponse à l'émission en courant, $\underline{S}_{I,P}$. À une distance r_{PG} de son centre de référence et dans la direction de référence spécifiée dans la définition de $\underline{S}_{I,P}$, le **récepteur vectoriel** produit un signal de tension $U_{PG}(t)$, et l'impédance électrique de transfert de ce couple de transducteurs dans le champ acoustique sphérique est donnée par:

$$\underline{Z}_{PG} = \frac{\mathcal{F}(U_{PG}(t))}{\mathcal{F}(I_P(t))} = \left(1 + \frac{1}{jkr_{PG}}\right) \frac{-jk\underline{S}_{I,P}M_{pg}}{r_{PG}} e^{jk(r_{PG}-r_0)} \quad (15)$$

où, j est la racine carrée de moins un, k est le nombre d'onde acoustique M_{pg} est la **sensibilité de gradient de pression acoustique** du récepteur vectoriel, r_0 est égal à 1 mètre.

Placer alors le **récepteur vectoriel** G dans un autre champ acoustique produit par un transducteur réciproque T. Le centre de référence du **récepteur vectoriel** G se situe à une distance r_{TG} du centre de référence du transducteur réciproque T. Soit un signal de courant $I_T(t)$ circulant à travers le transducteur réciproque T avec une réponse à l'émission en courant, $\underline{S}_{I,T}$. Le **récepteur vectoriel** produit un signal de tension $U_{TG}(t)$, et l'impédance électrique de transfert de ce couple de transducteurs dans le champ acoustique sphérique est donnée par:

$$\underline{Z}_{TG} = \frac{\mathcal{F}(U_{TG}(t))}{\mathcal{F}(I_T(t))} = \left(1 + \frac{1}{jkr_{TG}}\right) \frac{-jk\underline{S}_{I,T}M_{pg}}{r_{TG}} e^{jk(r_{TG}-r_0)} \quad (16)$$

À la fin, placer le transducteur réciproque T dans un champ acoustique produit par le projecteur P, de sorte que le centre de référence du transducteur réciproque T se situe à une distance r_{PT} du centre de référence du projecteur P. Soit un courant $I_P(t)$ circulant à travers le projecteur P avec une réponse à l'émission en courant, $\underline{S}_{I,P}$. Le transducteur réciproque produit un signal de tension $U_{PT}(t)$, et l'impédance électrique de transfert de ce couple de transducteurs est donnée par:

$$\underline{Z}_{PT} = \frac{\mathcal{F}(U_{PT}(t))}{\mathcal{F}(I_P(t))} = \frac{\underline{S}_{I,P}M_T}{r_{PT}} e^{jk(r_{PT}-r_0)} \quad (17)$$

Pour un transducteur réciproque, le quotient de la sensibilité en champ libre et de la réponse à l'émission en courant est égal au paramètre de réciprocité des ondes sphériques $2r_0 / \rho f$ à la distance de référence de $r_0 = 1$ m:

$$\frac{M_T}{\underline{S}_{I,T}} = \frac{2}{j\rho f} e^{jkr_0} \quad (18)$$

À chaque fréquence acoustique, le module seul de **sensibilité de gradient de pression acoustique** en champ libre M_{pg} du **récepteur vectoriel** peut être déterminé à partir de la Formule (15) à la Formule (18) comme suit:

$$|M_{pg}| = \sqrt{\frac{2}{\rho f} \frac{|Z_{TG}| |Z_{PG}| r_{PG} r_{TG}}{|Z_{PT}| r_{PT}}} \sqrt{\frac{r_{PG} r_{TG}}{\sqrt{k^2 r_{TG}^2 + 1} \sqrt{k^2 r_{PG}^2 + 1}}} \quad (19)$$

La phase seule de la **sensibilité de gradient de pression acoustique** en champ libre M_{pg} est la suivante:

$$\arg(M_{pg}) = \frac{1}{2} [\phi_{TG} + \phi_{PG} - \phi_{PT} + k(r_{TG} + r_{PG} - r_{PT}) - \frac{\pi}{2} - \arctan(kr_{PG}) - \arctan(kr_{TG})] \quad (20)$$

où, ϕ_{PG} est l'angle de phase de l'impédance électrique de transfert Z_{PG} , ϕ_{TG} est l'angle de phase de l'impédance électrique de transfert Z_{TG} et ϕ_{PT} est l'angle de phase de l'impédance électrique de transfert Z_{PT} .

NOTE L'erreur de mesure des distances influe de manière significative sur l'étalonnage de l'angle de phase de sensibilité. Lorsque les transducteurs peuvent être alignés comme cela est représenté à la Figure 3, alors les distances entre eux présentent une relation de $r_{PG} + r_{TG} = r_{PT}$, et l'erreur de mesure de l'angle de phase peut être réduite. La Formule (20) peut pour sa part être simplifiée comme suit:

$$\arg(M_{pg}) = \frac{1}{2} [\phi_{TG} + \phi_{PG} - \phi_{PT} - \frac{\pi}{2} - \arctan(kr_{PG}) - \arctan(kr_{TG})]$$

Le **niveau de sensibilité de gradient de pression acoustique** peut être calculé à partir de la Formule (10). D'autres sensibilités peuvent être calculées à partir de la Formule (13), et leurs niveaux de sensibilité peuvent être calculés selon les définitions à l'Article 3.

9.1.3 Mesurage

Il convient d'aligner le projecteur, le **récepteur vectoriel** et le transducteur réciproque dans l'eau comme cela est décrit à la Figure 3. La méthode d'alignement des transducteurs et la méthode de suspension du **récepteur vectoriel** sont spécifiées en 6.5.3.

Le projecteur, le **récepteur vectoriel** et le transducteur réciproque doivent être immergés au centre de la cuve d'eau pour éliminer les ondes acoustiques réfléchies par la surface de délimitation et de l'eau.

L'impédance de transfert du couple de transducteurs doit être mesurée et la sensibilité du **récepteur vectoriel** doit être calculée, comme cela est spécifié en 9.1.2.

NOTE Le canal de réception du **récepteur vectoriel** a une forte directivité. Pendant l'étalonnage, le canal du **récepteur vectoriel** à étalonner est orienté vers l'axe principal du projecteur.

9.1.4 Incertitude

L'incertitude globale de l'étalonnage doit être déterminée et exprimée avec la valeur de la sensibilité. L'incertitude globale élargie (niveaux de confiance à 95 %) de l'étalonnage peut être inférieure à 0,7 dB en effectuant l'essai minutieusement.

9.2 Étalonnage en champ libre par interférométrie optique

9.2.1 Généralités

Il est décrit une méthode absolue d'étalonnage des **récepteurs vectoriels** en champ libre par interférométrie optique. L'interféromètre optique sert à mesurer la **vitesse de particule acoustique** au centre de référence du canal du **récepteur vectoriel** à étalonner. La méthode peut être appliquée dans la plage de fréquences de 2 kHz à 10 kHz selon la taille de la cuve d'essai. Il s'agit d'une méthode d'étalonnage absolue de la **sensibilité de vitesse de particule acoustique** du canal de réception des **récepteurs vectoriels** [20], [21], [22].

9.2.2 Principe

La Figure 4 représente le schéma d'étalonnage en champ libre du **récepteur vectoriel** à l'aide d'un interféromètre optique. Un projecteur excité par des signaux à salves d'impulsion est déployé dans l'eau, ce qui crée un champ acoustique à ondes permanentes dans la cuve d'eau. Une pellicule suspendue, optiquement réfléchissante et acoustiquement transparente, est déployée dans le champ lointain du projecteur. Un interféromètre optique permet de mesurer la vitesse de la pellicule. Le **récepteur vectoriel** suspendu à un anneau de montage est alors substitué à la pellicule. La tension de sortie du canal du **récepteur vectoriel** à étalonner est ensuite mesurée, et la **sensibilité de vitesse de particule acoustique** dudit canal peut être calculée.

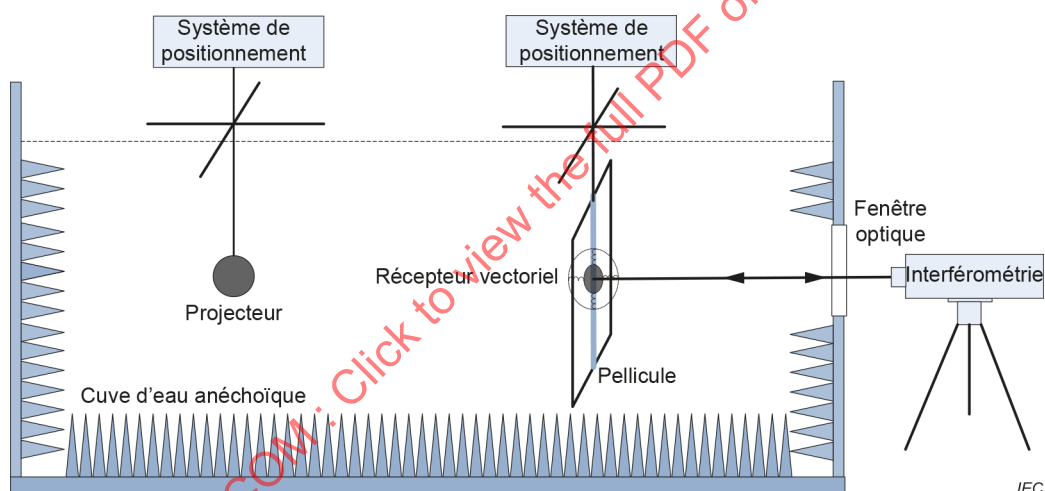


Figure 4 – Schéma d'étalonnage en champ libre du récepteur vectoriel par interférométrie optique

Dans le champ libre, la **vitesse de particule acoustique** u au centre de référence du canal du **récepteur vectoriel** à étalonner est exprimée comme suit:

$$|u| = \frac{K_i \cdot |\mathcal{F}(U_O(t))|}{|n^*|} \quad (21)$$

où K_i est le coefficient de sensibilité de l'interféromètre optique, $U_O(t)$ est le signal de tension de sortie de ce même interféromètre, et n^* est l'indice de réfraction effectif qui reflète l'effet acousto-optique dans le champ acoustique.

Le signal de tension de sortie du canal de **récepteur vectoriel** $U_{VR}(t)$ est mesuré. Selon la Formule (5), la **sensibilité de vitesse de particule acoustique** du canal du **récepteur vectoriel** à étalonner est la suivante:

$$\underline{M}_u = \frac{\mathcal{F}(U_{VR}(t)) \cdot \underline{n}^*}{K_1 \cdot \mathcal{F}(U_O(t))} \quad (22)$$

Le **niveau de sensibilité de vitesse de particule acoustique** peut être calculé à partir de la Formule (6). D'autres sensibilités peuvent être calculées à partir de la Formule (13), et leurs niveaux de sensibilité peuvent être calculés selon les définitions à l'Article 3.

9.2.3 Mesurage

Le faisceau laser de l'interféromètre optique pénètre dans le milieu et est incident sur la pellicule, puis réfléchi vers l'interféromètre. L'épaisseur de la pellicule doit être bien inférieure à la longueur d'onde de l'onde acoustique, et la vitesse mesurée par interféromètre optique est alors égale à la **vitesse de particule acoustique** dans l'eau.

Le **récepteur vectoriel** est suspendu à l'anneau de montage comme cela est spécifié en 6.5.3 et déployé dans la cuve d'eau, son centre de référence coïncidant avec le point de mesure sur la pellicule.

La tension de sortie de l'interféromètre optique et du canal du **récepteur vectoriel** à étalonner doit être mesurée, et la **sensibilité de vitesse de particule acoustique** dudit canal doit être calculée comme cela est spécifié en 9.2.2.

NOTE Pour éviter l'influence de l'onde acoustique de réflexion provenant de la surface et de la limite de la cuve d'eau de taille limitée, les transducteurs et la pellicule sont déployés dans la région centrale de ladite cuve.

9.2.4 Incertitude

L'incertitude globale de l'étalonnage en champ libre par interférométrie optique doit être déterminée et exprimée avec la valeur de la sensibilité. L'incertitude globale de sensibilité (niveaux de confiance à 95 %) de l'étalonnage peut être inférieure à 0,7 dB en effectuant l'essai minutieusement.

9.3 Étalonnage en champ libre à l'aide d'un hydrophone de référence

9.3.1 Généralités

Cette méthode décrit un étalonnage par comparaison à l'aide d'un **hydrophone** de référence dans des conditions en champ libre pour les **récepteurs vectoriels**. L'étalonnage d'un canal de **récepteur vectoriel** par une méthode de comparaison exige un **hydrophone** de référence étalonné et un projecteur auxiliaire. La méthode peut être appliquée dans la plage de fréquences de 250 Hz à 10 kHz dans une cuve d'eau de laboratoire [23], [24].

9.3.2 Principe

La Figure 5 représente le schéma d'étalonnage par comparaison en champ libre du **récepteur vectoriel** à l'aide d'un **hydrophone** de référence. Le projecteur P excité par des signaux à salves d'impulsion est déployé dans l'eau, ce qui crée un champ acoustique à ondes permanentes dans la cuve d'eau. Un **récepteur vectoriel** G et un **hydrophone** de référence R dans le champ lointain d'un projecteur P sont déployés à la même profondeur que le projecteur P, et les trois transducteurs sont alignés sous l'eau.

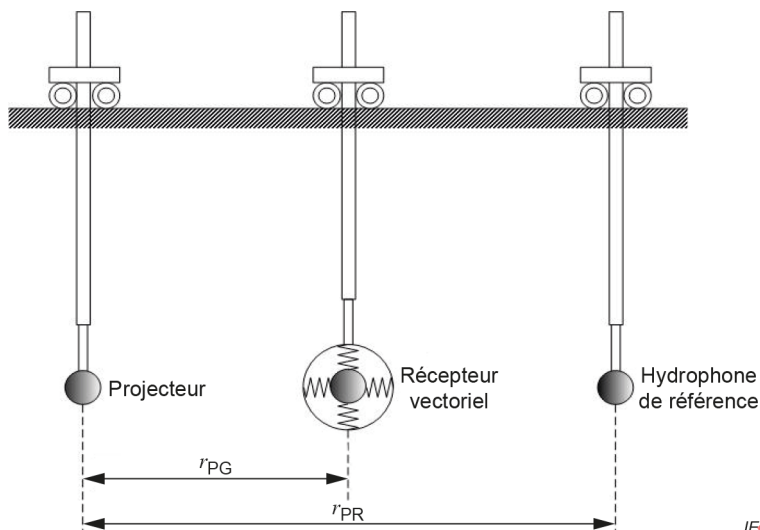


Figure 5 – Schéma d'étalonnage par comparaison en champ libre du récepteur vectoriel à l'aide d'un hydrophone de référence

Le signal de tension de sortie $U_{VR}(t)$ du canal de **récepteur vectoriel** à étalonner et le signal de tension en circuit ouvert de l'**hydrophone** de référence sont ensuite mesurés, et la **sensibilité de vitesse de particule acoustique** du canal de **récepteur vectoriel** dans le champ d'ondes acoustiques sphériques peut être calculée comme suit:

$$\underline{M}_u = \rho c \underline{M}_0 \frac{\mathcal{F}(U_{VR}(t))}{\mathcal{F}(U_0(t))} \cdot \frac{r_{PG}}{r_{PR} \left(1 + \frac{1}{jkr_{PR}}\right)} \quad (23)$$

Lorsque, r_{PG} est une distance entre le centre de référence du projecteur P et le centre de référence du **récepteur vectoriel** G, r_{PR} est une distance entre le centre de référence du projecteur P et le centre de référence de l'**hydrophone** de référence R, $\underline{M}_0$ est la sensibilité de l'**hydrophone** de référence étalonné, ρ est la densité de l'eau, c est la vitesse du son dans l'eau.

La **sensibilité d'accélération de particule acoustique**, la **sensibilité de déplacement de particule acoustique** et la **sensibilité de gradient de pression acoustique** peuvent être calculées à partir de la Formule (13), et leurs niveaux de sensibilité peuvent être calculés selon les définitions à l'Article 3.

9.3.3 Mesurage

Le **récepteur vectoriel** est suspendu à l'anneau de montage comme cela est spécifié en 6.5.3, et il est recommandé d'aligner le projecteur, le **récepteur vectoriel** et l'**hydrophone** de référence dans des conditions en champ libre comme cela est représenté à la Figure 5. Les distances entre les centres de référence du projecteur et le **récepteur vectoriel**, le projecteur et l'**hydrophone** de référence sont alors mesurées.

La tension de sortie du canal de **récepteur vectoriel** à étalonner et la tension en circuit ouvert de l'**hydrophone** de référence doivent être mesurées, et la sensibilité du **récepteur vectoriel** doit être calculée comme cela est spécifié en 9.3.2.

NOTE L'**hydrophone** de référence est étalonné par une méthode d'étalonnage absolue telle que la méthode par réciprocité en champ libre avec une faible incertitude de mesure.

9.3.4 Incertitude

L'incertitude globale de l'étalonnage en champ libre à l'aide d'un **hydrophone** de référence doit être déterminée et exprimée avec la valeur de la sensibilité. L'incertitude élargie globale de sensibilité (niveaux de confiance à 95 %) peut être inférieure à 1,5 dB en effectuant l'essai minutieusement.

10 Étalonnage dans un tube à ondes stationnaires

10.1 Étalonnage à l'aide d'un accéléromètre de référence

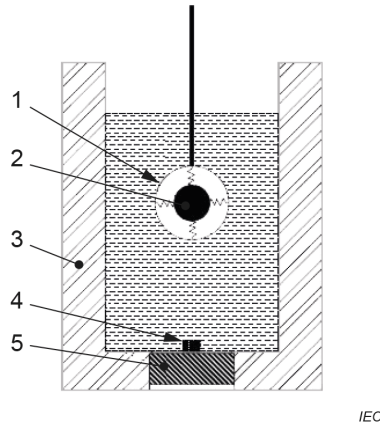
10.1.1 Généralités

Cette méthode décrit un étalonnage par comparaison à l'aide d'un accéléromètre de référence pour les **récepteurs vectoriels**. L'accéléromètre de référence est utilisé pour mesurer l'accélération sur la surface d'un projecteur au fond de la chambre du tube, et l'accélération au centre de référence du **récepteur vectoriel** peut être calculée. La méthode peut être appliquée dans la plage de fréquences de 5 Hz à (au moins) 400 Hz dans un tube à ondes stationnaires verticales. Il s'agit d'une méthode d'étalonnage relative de la **sensibilité d'accélération de particule acoustique** du canal de réception des **récepteurs vectoriels** [25], [26], [27], [28].

10.1.2 Principe

La Figure 6 représente le schéma de l'étalonnage dans un tube à ondes stationnaires verticales à l'aide d'un accéléromètre de référence pour les **récepteurs vectoriels**. La chambre du tube est remplie d'eau, et un projecteur est déployé au fond de la chambre et vibre de façon sinusoïdale pour créer un champ d'ondes acoustiques stationnaires dans le tube. Un **récepteur vectoriel** suspendu à un anneau de montage est immergé sous l'eau à la profondeur de h .

Dans le tube à ondes stationnaires, la longueur d'onde acoustique est supérieure à la longueur de la colonne de liquide, et l'accélération au centre de référence du **récepteur vectoriel** peut être calculée à partir du mesurage de l'accélération à la surface du projecteur au fond de la chambre du tube. Lorsque la tension de sortie du canal de **récepteur vectoriel** à étalonner est mesurée, la **sensibilité d'accélération de particule acoustique** dudit canal peut être calculée à partir de la Formule (7).



Légende

- 1 anneau de montage
- 2 récepteur vectoriel
- 3 chambre
- 4 accéléromètre de référence
- 5 projecteur

Figure 6 – Schéma d'étalonnage dans un tube à ondes stationnaires verticales à l'aide d'un accéléromètre de référence

Dans la chambre, le module de l'accélération d'une particule acoustique au centre de référence du canal de **récepteur vectoriel** à étalonner est exprimé comme suit:

$$|a_h| = |a_0| \frac{S_1 \cos(kh)}{S_2 \cos(kl)} \quad (24)$$

où $|a_0|$ est le module de l'accélération sur la surface du projecteur, $|a_h|$ est le module de l'accélération au centre de référence du canal de **récepteur vectoriel**, S_1 est la surface du projecteur, S_2 est la section transversale interne de la chambre, l est la longueur de la colonne de liquide dans le tube à ondes stationnaires.

Le signal de tension émis par l'accéléromètre de référence est $e_a(t)$, et sa sensibilité est s_{ea} . L'accélération peut alors être calculée par:

$$|a_0| = \frac{|\mathcal{F}(e_a(t))|}{s_{ea}} \quad (25)$$

Le signal de tension de sortie du canal de **récepteur vectoriel** $U_{VR}(t)$ est mesuré. Selon la Formule (7), le module de la **sensibilité d'accélération de particule acoustique** du canal de **récepteur vectoriel** à étalonner est le suivant:

$$|M_a| = \frac{S_2 \cos(kl)}{S_1 \cos(kh)} \frac{s_{ea}}{|\mathcal{F}(e_a(t))|} |\mathcal{F}(U_{VR}(t))| \quad (26)$$

Le **niveau de sensibilité d'accélération de particule acoustique** peut être calculé à partir de la Formule (8). D'autres sensibilités peuvent être calculées à partir de la Formule (13), et leurs niveaux de sensibilité peuvent être calculés selon les définitions à l'Article 3.

10.1.3 Mesurage

L'accéléromètre de référence étalonné est fixé rigidement sur la surface du projecteur au fond de la chambre du tube, de sorte qu'il co-vibre avec le projecteur.

NOTE L'accéléromètre de référence n'a aucune influence sur les vibrations du projecteur.

Le **récepteur vectoriel** est suspendu à l'anneau de montage comme cela est spécifié en 6.5.3 et déployé à la profondeur d'immersion dans l'eau de la chambre du tube, et la profondeur d'immersion doit être mesurée.

La tension de sortie de l'accéléromètre de référence et du canal de **récepteur vectoriel** à étalonner doit être mesurée, et la **sensibilité d'accélération de particule acoustique** dudit canal doit être calculée comme cela est spécifié en 10.1.2.

10.1.4 Incertitude

L'incertitude globale de l'étalonnage dans un tube à ondes stationnaires à l'aide d'un accéléromètre de référence doit être déterminée et exprimée avec la valeur de la sensibilité. L'incertitude globale de sensibilité (niveaux de confiance à 95 %) de l'étalonnage peut être inférieure à 1,0 dB en effectuant l'essai minutieusement.

10.2 Étalonnage par comparaison à l'aide d'un hydrophone de référence dans un tube à ondes stationnaires

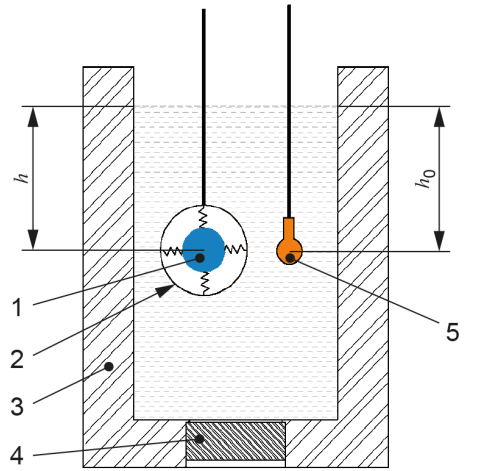
10.2.1 Généralités

Cette méthode décrit un étalonnage par comparaison à l'aide d'un **hydrophone** de référence dans un tube à ondes stationnaires pour les **récepteurs vectoriels**. Un **hydrophone** de référence étalonné sert à mesurer la pression acoustique au centre de référence du **récepteur vectoriel** à étalonner. La méthode peut être appliquée dans la plage de fréquences de 5 Hz à 2 kHz dans un tube à ondes stationnaires verticales [8], [29], [30], [31].

10.2.2 Principe

La Figure 7 représente le schéma de l'étalonnage dans un tube à ondes stationnaires verticales à l'aide d'un **hydrophone** de référence pour les **récepteurs vectoriels**. La chambre du tube est remplie d'eau, et un projecteur est déployé au fond de la chambre et vibre de façon sinusoïdale pour créer un champ d'ondes acoustiques stationnaires dans le tube. Un **récepteur vectoriel** suspendu à un anneau de montage est déployé à la profondeur d'immersion de h .

L'**hydrophone** de référence est déployé à la profondeur d'immersion de h_0 . Dans le tube à ondes stationnaires, la longueur d'onde acoustique est supérieure à la longueur de la colonne de liquide, et la pression acoustique au centre de référence du **récepteur vectoriel** peut être calculée par mesurage de la pression acoustique de l'**hydrophone** de référence.



IEC

Légende

- 1 récepteur vectoriel
- 2 anneau de montage
- 3 chambre
- 4 projecteur
- 5 hydrophone de référence

Figure 7 – Schéma d'étalonnage dans un tube à ondes stationnaires verticales à l'aide d'un hydrophone de référence

Le signal de tension de sortie de l'**hydrophone** de référence est $U_0(t)$, et le module de la pression acoustique au centre de référence du canal vectoriel d'ondes acoustiques à étalonner est exprimé comme suit:

$$|p_h| = \frac{\cos(kh)}{\sin(kh_0)} \frac{|\mathcal{F}(U_0(t))|}{|\underline{M}_0|} \quad (27)$$

où, k est le nombre d'onde acoustique, et $\underline{M}_0$ est la sensibilité de l'**hydrophone** de référence étalonné.

Le **gradient de pression acoustique** au centre de référence du canal vectoriel d'ondes acoustiques peut s'exprimer comme suit:

$$|\nabla p_h| = k \frac{\sin(kh)}{\sin(kh_0)} \frac{|\mathcal{F}(U_0(t))|}{|\underline{M}_0|} \quad (28)$$

Le signal de tension de sortie du canal de **récepteur vectoriel** $U_{VR}(t)$ est mesuré. Le module de la **sensibilité de gradient de pression acoustique** du canal de **récepteur vectoriel** à étalonner est le suivant:

$$|\underline{M}_{pg}| = \frac{|\mathcal{F}(U_{VR}(t))| \sin(kh_0)}{|\mathcal{F}(U_0(t))| k \sin(kh)} |\underline{M}_0| \quad (29)$$