

国家计量技术规范
合成孔径声呐
(征求意见稿)
编写说明

规范起草组

2025年5月

目 录

一、任务来源	1
二、制定背景	2
三、编写过程	4
四、编写依据和编写原则	4
五、主要技术内容	5
六、不确定度评定	11
七、其他说明	11

一、任务来源

根据国家市场监督管理总局《市场监管总局办公厅关于印发 2024 年国家计量技术规范制定、修订及宣贯计划的通知》（市监计量发〔2024〕40 号），由交通运输部天津水运工程科学研究所组织成立了《合成孔径声呐校准规范》国家计量校准规范起草小组，承担校准规范的编写工作。《合成孔径声呐校准规范》归口于全国水运专用计量器具计量技术委员会。

本规范主要起草人及其分工见表 1。

表 1 规范主要起草人及其主要工作

序号	姓名	单位	职称/职务	主要工作内容
1	柳义成	交通运输部天津水运工程科学研究所	工程师	负责规范中关键指标的确认，起草规范中 5 计量特性和 7 校准项目和校准方法。
2	张良	交通运输部东海航海保障中心	高级工程师	起草规范中 4 概述和 7 校准项目和校准方法。
3	陈鑫	上海迈波科技有限公司	高级工程师	提供校准样机，起草规范中 7 校准项目和校准方法，参与校准试验验证。
4	张济博	自然资源部第二海洋研究所	高级工程师	起草规范中附录 A 至附录 C，完善 3 术语。
5	唐劲松	海军工程大学	研究员	起草规范中 8 校准结果表发，编写不确定度报告及试验报告。
6	苏希华	上海地海科技有限公司	高级工程师	起草规范中 6 校准条件，负责现场试验操作及规范和编写说明的编辑性工作。
7	王俊	国防科技大学	教授	起草规范中 2 引用文件和 6 校准条件，编写不确定度报告及编写说明。

二、制定背景

（一）目的意义

海洋水下探测成像中，尤其是对海底小目标探测与海底地形地貌探测，高清晰实时成像是终极目标。合成孔径声呐成像技术是当前获得水下大范围高清实时成像最有效的手段，一直是水下探测技术的制高点。采用合成孔径技术实现的超高分辨水下成像声呐系统具备看得见（目标发现概率大）、看的清（图像分辨率高）和看得远（探测成像效率高）三大优点，尤其是分辨率极高，对于精细小目标探测能力显著。

合成孔径声呐的主要性能指标包括工作频率、最大探测距离、脉冲重复频率、脉冲宽度、距离分辨率、方位分辨率、测绘带宽与测绘速率等，其中工作频率、最大作用距离、脉冲重复频率、脉冲宽度的定义或者计算方法与侧扫声呐相同。

针对合成孔径声呐目前还没有可执行的对应、可用标准的问题，起草组结合合成孔径声呐技术发展的现状，为实现合成孔径声呐量值的准确可靠制定本规范。本规范的制定也是满足社会经济发展和科学技术研究的需要，通过本校准规范可以建立合成孔径声呐测量不确定度与测量结果之间的联系，提高测量结果的可信度和可比性，从而促进贸易公平、推动科学技术发展。本规范的制定同时也为了提高合成孔径声呐的测量准确性和一致性，确保不同设备之间的测量结果具有可比性，以及为声呐设备的校准提供可参考的技术标准。

通过制定合成孔径声呐校准规范，可以促进声呐技术的发展和應用，提高水下探测的准确性和可靠性，为海洋科学研究、海洋资源开发、海洋环境监测等领域提供有力的技术支持。

（二）国内外现状

1.相关计量器具国内外生产、使用的情况（重点说明国内）

国外开展高精度海底合成孔径声呐成像技术研究较为成熟的是美国、法国和挪威。该成像技术概念自 20 世纪 60 年代末首次被提出，已经经历了近 60 年的发展，至今产生出多种技术路线的系统。尤其进入 21 世纪以来，随着对水声物理、水声信号处理技术研究的突破创新，合成孔径声呐的各种相关技术愈发成熟。国外已有美国 Northrop Grumman、法国 Ixblue、美国应用信号技术公司、挪威 Kongsberg、加拿大 Kraken、英国 Thales 等多家公司推出了多套高性能的军用和商用合成孔径声呐产品，标志着高精度海底成像技术进入了相对快速的发展时期。

虽然国内对高精度海底成像技术研究起步较晚，但近年来在市场需求和政策引领之下，我国相关技术也进入了快速发展期。国内开展合成孔径声呐研制的单位有中国科学院声学研究所、海军工程大学、中船重工 715 所、苏州桑泰海洋仪器研发有限责任公司、上海迈波科技有限公司、哈尔滨工程大学等。其中，苏州桑泰侧重于双频合成孔径声呐的产品研制，上海迈波侧重小型化合成孔径声呐的研制和高速合成孔径声呐的研发。

2.国内合成孔径声呐校准技术发展现状

目前，国内外已经发布了一些合成孔径声呐的测试方法，如国际电工委员会（IEC）发布的相关标准、美国海军的测试方法等，由于合成孔径声呐属于国外对我禁运装备，相关测试方法涉及敏感内容，因此本规范不参照国际标准。

国内现有临时性处理办法是参照部门计量检定规程《侧扫声呐》[JJG(交通)165-2020]或者船舶行业标准《合成孔径声呐》（CB / T 4436-2019）进行计量，但是侧扫声呐部门计量检定规程的内容与合成孔径声呐的工作原理、工作

方式以及工作对象完全不同，该规程不完全适用作为合成孔径声呐的计量；合成孔径声呐的船舶行业标准范围仅适用于该设备的设计、生产、试验和验收，并不包含计量特性，而且行业标准主要针对特定行业内的技术要求进行规范，其应用范围相对较窄。

三、编写过程

2023年初，交通运输部天津水运工程科学研究所通过查阅文献、走访调研的方式充分熟悉了合成孔径声呐的结构组成、工作原理及应用领域等内容，同时掌握了该设备标准化研究现状，为后续项目立项奠定了坚实的研究基础。

2023年12月，在全国水运专用计量器具计量技术委员会的指导下，规范承担单位填报《合成孔径声呐校准规范》的国家计量技术规范制修订项目申报书，并起草了《合成孔径声呐校准规范（草案）》及编制说明。

2024年5月，获得国家市场监督管理总局下达的制定计划通知。

2024年6月，成立规范起草组，细化工作内容，明确工作分工。

2024年7月，开展量传源方法研究，确定计量技术参数及指标，建立量值溯源路线。

2024年8月至9月，以上海迈勃科技有限公司 DASAS-1 型合成孔径声呐为样机对校准项目开展了试验验证。

四、编写依据和编写原则

（一）编写依据

本规范根据 JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》进行编写，并在编写中参考了以下有关文件：

JJF 1001-2011 《通用计量术语及定义》

JJF 1034-2020 《声学计量术语及定义》

JJF 1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》

GB/T 3223-94 《声学 水声换能器自由场校准方法》

GB/T 3947-1996 《声学名词术语》

JJG(交通)165-2020 《侧扫声呐》

CB/T 4436-2019 《合成孔径声纳》

JTS 131-2012 《水运工程测量规范》

（二）编写原则

项目是在交通运输部部门计量检定规程 JJG(交通)165-2020《侧扫声纳》以及船舶行业标准 CB/T 4436-2019《合成孔径声纳》提出的相关计量性能要求的基础上，对国内市场上的合成孔径声纳进行重新梳理，形成合成孔径声纳国家计量技术规范。

校准规范应做到：

——符合国家有关法律、法规的规定；

——适用范围应明确，在其界定的范围内，按需要力求完整；

——充分考虑技术和经济的合理性，并为采用最新技术留有空间。

在校准规范的编写过程中，都必须执行国家的各种法律、法规，国家颁布的《国务院关于在我国统一实行法定计量单位的命令》、JJF 1001《通用计量术语及定义》、JJF 1094《测量仪器特性评定》、JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》等。针对的对象应该界定清晰，不应该与其他检定规程或校准规范相互矛盾。

国家计量校准规范适用于各种校准实验室的需要。很显然，由于各种校准实验室的服务目标不同，实验室之间的差异是很大的，如校准测量能力、测量范围、环境条件、设备条件、人员能力等各不相同。因此，国家计量校准规范规定的内容既要提纲挈领，又要适用范围明确，在其界定的范围内，力求完整。国家计量技术规范通过对核心要素的规定，保证不同实验室对同种计量器具开展校准的结果具有相同的含义。

五、主要技术内容

按照 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》要求，本规范包括 8 个章节和三个附录：1 范围、2 引用文件、3 术语、4 概述、5 计量特性、6 校准条件、7 校准方法、8 校准结果表达、9 复校时间间隔，以及附录 A 原始记录格式，附录 B 校准证书内页格式、附录 C 测量不确定度评定示例。

（一）范围

本规范适用于二维合成孔径声纳、干涉合成孔径声纳校准。

根据测量性能合成孔径声呐分为二维合成孔径声呐和干涉合成孔径声呐。其中，二维合成孔径声呐通过虚拟孔径形成高分辨率二维图像，包括距离和方位两个维度，横向分辨率与工作频率和探测距离无关。干涉合成孔径声呐在二维成像基础上增加高度维度，通过相位干涉获取三维信息，实现海底地形或目标的高精度三维重建。起草组基于六面消声水池、标准水听器、标准目标快套组等标准器及配套设施按照规范要求完成各校准项目试验验证，结果表明该校准规范适用于二维合成孔径声呐、干涉合成孔径声呐校准。

（二）引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1034-2020 声学计量术语及定义

GB/T 7965-2002 声学 水声换能器测量

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

本规范在第三章术语中引用了 JJF 1034-2020 声学计量术语及定义。

本规范分别在第三章术语和第 6.2.4 节中引用了 GB/T 7965-2002 声学 水声换能器测量。

（三）术语

JJF 1034-2020和GB/T 7965-2002界定的术语和定义适用于本规范。如：

消声水池 **anechoic water tank**: 在所有界面上均敷设能有效吸收声能的吸声材料，使在一定区域内形成自由声场的测量水池。

（四）概述

本章节主要对合成孔径声呐的组成、原理和用途等方面进行了简要概述。

用途：合成孔径声呐已被广泛应用于水下目标探测与识别、海洋工程与基础设施监测、海洋地形测绘与地质调查等领域。

组成：合成孔径声呐由发射阵列、接收阵列和信号处理单元等组成。

工作原理：利用合成孔径成像原理，通过小物理声学基阵运动，逐次发射、接收和存储信号，再把所有存储的回波信号进行相干叠加获得一个虚拟大孔径阵列，进而产生一个窄波束，实现探测高分辨率走航方向的声呐。

（五）计量特性

1.工作频率误差

合成孔径声呐标称工作频率与实际工作频率值之差，最大允许误差为 $\pm 1\% F$ ， F 为实际工作频率。

合成孔径声呐工作频率通常集中在10kHz-500kHz范围，高频段适用于高分辨率海底地形测绘，低频段则优先用于远距离目标探测或掩埋物穿透成像，是衡量合成孔径声呐性能的重要指标之一。最大允许误差的确定参考了产品的技术参数、专家建议及试验结果等。

2.方位向分辨率示值误差

合成孔径声呐方位向分辨率示值与实际方位向分辨率之差，最大允许误差为 $\pm 10\text{mm}$ 。

合成孔径声呐的方位向分辨率是其核心性能指标，指声呐在与声波传播方向垂直的方位维度上区分两个相邻目标的能力，该分辨率由等效合成孔径长度决定，与传统声呐依赖物理孔径的特性具有本质差异。物理基阵越小，理论分辨率越高，但需平衡信号接收灵敏度。最大允许误差的确定参考了产品的技术参数、专家建议及试验结果等。

3.距离向分辨率示值误差

合成孔径声呐距离向分辨率示值与实际距离向分辨率之差，最大允许误差为 $\pm 10\text{mm}$ 。

合成孔径声呐的距离向分辨率是其核心成像指标之一，主要反映系统沿声波传播方向区分相邻目标的能力，该分辨率特性与方位向分辨率形成正交探测能力，共同支撑合成孔径声呐实现高精度水下成像。最大允许误差的确定参考了产品的技术参数、专家建议及试验结果等。

4.声源级误差

合成孔径声呐标称声源级与实际声源级示值之差，最大允许误差为 $\pm 10\%SL$ ， SL 为实际声源级。

5.垂直波束宽度误差

合成孔径声呐标称垂直波束宽度与实际垂直波束宽度示值之差，最大允许误差为 $\pm 10\%B$ ， B 为实际波束宽度。

6.高程示值误差

合成孔径声呐高程示值与实际高程示值之差，最大允许误差为 $\pm 1\%D$ ， D 为实际高程。

高程示值误差是评价干涉合成孔径声呐测量性能的关键指标之一。最大允许误差的确定参考了产品的技术参数及专家建议等。

（六）校准条件

1.环境条件

校准环境条件的规定主要考虑温度与湿度环境应能保证合成孔径声呐校准过程的正常进行，依据《水文仪器基本环境检定条件及方法》（GB/T9359-2016）起草本部分内容。

2.设施与设备

校准设施与设备应符合表 2 的规定。

表 2 校准设施与设备及技术指标

序号	名称	主要技术指标	用途
1	钢卷尺	测量范围：0~10m，准确度等级：Ⅱ级	测量标准水听器至换能器基阵之间的距离。
2	声速剖面仪	最大允许误差： ± 0.2 m/s	测量试验水池中声速，用于被校设备声速修正。
3	标准水听器	频率范围 0.1 MHz~2.5 MHz，扩展不确定度 $U=0.9$ dB($k=2$)	作为工作频率和声源级校准的标准器，采集换能器发射的开路电压。
4	信号采集器	最高采样频率为 10 MHz，电压测量扩展不确定度 $U=2$ mV($k=2$)	存储水听器采集的开路电压。
5	标准目标块套组	边长 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cm、30 cm、50 cm 正方体目标块，最大允许误差 ± 0.2 cm	高程示值误差的标准器
6	消声水池	对频率高于 5kHz 的声波吸声系数应不低于 0.99。可以使合成孔径声呐与标准水听器中心间的距离满足远场条件。	为被校设备提供自由场、远场校准条件。
7	试验车	位于试验水池之上，应配有回转/升降装置，角度控制最大允许误差 $\pm 0.1^\circ$ ，位移控制最大允许误差 ± 0.5 cm，速度控制最大允许误差 ± 0.01 m/s。	调节合成孔径声呐、声速剖面仪及标准水听器等测量设备的位置与姿态。

校准选用的计量标准器应满足上述性能要求，也可以使用更高准确度的标准器。

（七）校准方法

1.工作频率误差

对于工作频率误差的校准，规范选择直接测量法。通过试验车的操作平台使标准水听器位于换能器基阵的声轴线上，标准水听器直接采集换能器基阵发射的开路电压，储存于信号采集器中，通过傅里叶变换将储存的时域信号转换为频率信号可获得实际工作频率，与标称值作差计算工作频率误差。

2.分辨率示值误差

距离向分辨率和方位向分辨率同步校准。首先在水池底部中间位置铺设沿着平行航迹线方向和垂直航迹线方向铺设标准目标块套组。目标块间隔由合成孔径声呐标称的分辨率确定。控制试验车使合成孔径声呐从水池边缘 A 均速移动到水池另一边缘 B，发射阵完整扫过标准目标块套组。分别判读声图像上平行航迹线方向和垂直航迹线方向的两个目标块量取目标块之间的距离，与目标块之间标准距离值作差计算分辨率示值误差。

3.声源级误差

对于合成孔径声呐声源级的校准，规范选择直接测量法。通过操作平台使标准水听器位于换能器基阵的声轴线上，使用光卷尺测量二者的直线距离，标准水听器采集换能器基阵发射的声压级，储存于信号采集器中，根据规范中的公式（1）可计算出换能器基阵的实际声源级。

4.垂直波束宽度误差

对于合成孔径声呐的波束宽度误差，规范选择比较法进行校准。当换能器与标准水听器相隔一定距离时，保持标准水听器位置不变，通过操作平台水平旋转换能器基阵，水听器采集基阵位于不同角度时的开路电压，绘制指向性图，从图中最高点下降 3dB 左右两侧夹角为实际波束宽度，与标称值作差计算误差。

5.高程示值误差

对于合成孔径声呐的高程示值误差，规范选择直接测量法进行校准。以目标块的实际高度为标准，与合成孔径声呐图像采集的高程作差，计算示值误差。

（八）校准结果表达

校准后，出具校准证书。校准结果应在校准证书上反映，校准证书应至少包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称与地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用性有关，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称和代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务和等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的说明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

校准原始记录格式见附录A，校准证书内页格式见附录B。

（九）复校时间间隔

依据JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》要求对复校时间间隔进行了规定：“建议合成孔径声呐的复校时间间隔为12个月。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者等诸因素所决定的，因此，建议送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。”

六、不确定度评定

为了验证校准方法的科学性，对合成孔径声呐的校准结果进行了不确定度评定，见附录 C《测量结果的不确定度评定示例》。

七、其他说明

（一）与国际计量规范、国内标准等技术文件的兼容情况

本规范起草过程中查阅了国外关于合成孔径声呐的规范及标准，没有检索到相关文件，不存在兼容情况。同时查阅了国内相应的规范及标准，2019 年工业和信息化部发布了船舶行业标准《合成孔径声呐》（CB / T 4436-2019），该标准仅适用于合成孔径声呐的设计、生产、试验和验收，并不包含计量特性，不存在兼容情况。

（二）对重大分歧意见的处理结果和依据等

无。
