



华中科技大学学报(自然科学版)

Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)

ISSN 1671-4512,CN 42-1658/N

《华中科技大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目：考虑目标空间方位声学特性的多基地探测效能研究
作者：陆啸天，魏良媛，龚志雄
DOI：10.13245/j.hust.260186
收稿日期：2026-04-14
网络首发日期：2026-05-29
引用格式：陆啸天，魏良媛，龚志雄. 考虑目标空间方位声学特性的多基地探测效能研究[J/OL]. 华中科技大学学报(自然科学版).
<https://doi.org/10.13245/j.hust.260186>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13245/j.hust.260186

考虑目标空间方位声学特性的多基地探测效能研究

陆啸天 魏良媛 龚志雄

(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要 针对现有多基地声纳探测效能研究对复杂目标多基地声散射空间指向性特征考虑不足的问题, 提出一种考虑目标空间方位声学特性的多基地探测范围修正方法, 以提高多基地声纳探测效能评估的准确性。通过声学建模、数值仿真与水箱实验, 以实心球目标声散射为例开展研究, 揭示双基地条件下目标强度随空间方位参数变化的基本规律。在此基础上, 提出了一种基于空间目标强度的双基地等效探测距离修正算法, 可用于评估不同节点条件下的多基地声纳探测概率与作用范围。研究表明, 与传统恒定目标强度模型相比, 修正方法所得的多基地探测概率分布呈现出显著差异, 其边界不再符合传统的卡西尼卵形线, 而受目标的空间声散射特性影响, 因此所提方法能更准确地预报系统的可探测边界。研究成果可为真实湖海态势下多基地声纳系统探测性能评估、节点配置分析及作用范围预测提供参考。

关键词 多基地声纳; 探测效能; 空间目标强度; 水箱实验; 探测范围修正

中图分类号 U666.72 文献标志码 A 文章编号 1671-4512(XXXX)XX-XXXX-XX

Research on Multistatic Detection Efficiency Considering the Acoustic Characteristics of Target at Different Spatial Orientation

LU Xiaotian WEI Liangyuan GONG Zhixiong

(School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract To address the issue that existing research on multistatic sonar detection performance insufficiently considers the spatial directivity characteristics of multistatic acoustic scattering from complex targets, a correction method for multistatic detection range that accounts for the spatial azimuth acoustic characteristics of the target was proposed to improve the accuracy of multistatic sonar detection performance evaluation. Through acoustic modeling, numerical simulation and tank experiments, taking the acoustic scattering of a solid spherical target as an example, the study was conducted to reveal the fundamental variation pattern of target strength (TS) with spatial azimuth parameters under bistatic conditions. On this basis, a correction algorithm for the bistatic equivalent detection distance based on the spatial target strength (STS) was proposed, which can be used to evaluate the detection probability and operation range of multistatic sonar under different node configurations. The results indicate that, compared with the traditional constant target strength model, the multistatic detection probability distribution obtained by the proposed correction method exhibits significant differences; its boundary no longer conforms to the traditional Cassini oval, but is influenced by the spatial acoustic scattering characteristics of the target. Therefore, the proposed method can more accurately predict the detectable boundary of the system. The research outcomes can provide a reference for the detection performance evaluation, node configuration analysis and operation range prediction of multistatic sonar systems under real lake and sea conditions.

收稿日期 2026-4-14.

作者简介 陆啸天(2000-), 男, 硕士研究生; 龚志雄(通信作者), 副教授, E-mail: zhixiong.gong@sjtu.edu.cn.

基金项目 国家自然科学基金优秀青年科学基金(海外)(24Z990200542); 上海交通大学 AI for Engineering 赋能计划资助项目(26X010100008).

Key words multistatic sonar; detection performance; spatial target strength; tank experiment; detection range correction

近年来,随着海洋开发和航运贸易的大力发展,水下目标探测技术正面临着新的严峻考验。例如,由于目标辐射噪声和回波强度大幅降低和海洋环境中的背景噪声逐年增加^[1],导致用于目标探测识别的信噪比显著降低。多基地声纳系统因其收发分置的特点,相较于传统单基地声纳,在反潜作战、水下监视等领域展现出了显著优势,主要包括:更高的系统隐蔽性(接收基地可远离危险区域)、更广的探测覆盖范围以及更强的抗干扰与反隐身能力。随着水下无人系统集群与分布式作战概念的发展,其为多基地探测提供了灵活的平台基础,使得该技术成为水下探测领域的热点与研究前沿。

目前,国内外学者围绕多基地声纳系统探测技术已开展了广泛而深入的研究,并在系统建模^[2]、探测范围分析^[3-4]与应用研究^[5-8]等方面均取得了重要进展。与此同时,在目标散射特性方面,部分研究已开始关注收发分置下目标的散射特性。传统计算目标声散射主要有简正级数解、有限元和板块元等方法^[9],可用于多基地散射特性的数值计算。王成^[10]通过仿真与水池实验,定量给出了水下简单目标强度随分置角的变化关系,但未对直达波进行分离,也未验证实验结果。针对复杂目标,冯雪磊等^[11]采用改进板块元方法对标准潜艇模型的双基地目标强度进行建模计算,但无实际实验。Fischell 和 Schmidt^[12]利用移动声源与多接收 AUV 协同采集多基地散射数据,通过分析不同分置角下的散射信号频率成分,构建了反演目标形状、材质与尺寸模型,实现了对于目标的高精度分类。Heather 和 Philip^[13]利用收发分置实验获得水下弹性目标在 0-20°分置角下的背向散射数据,并通过准全息反向传播技术定位虚拟源,揭示了轴向聚焦的物理机理。可见,现有的收发分置实验多是在小分置角下进行,且绝大部分多基地探测范围分析或效能评估仍沿用或受限于恒定目标强度的假设^[14-16]。将目标空间方位声学特性与多基地声纳探测范围预估进行结合的研究尚显不足,尤其缺乏一套便于工程应用的通用评估方法。

本文针对传统多基地声纳探测模型中的一个理论假设不足开展研究:传统的多基地声纳方程与探测范围分析通常将目标强度(Target Strength, TS)简化为一个常数。狭义 TS 的定义用于描述收发合置态势下目标反射声波的能力,针对多基地探测态势,

本文采用空间目标强度(Spatial Target Strength, STS)(有称双站目标强度^[17]),定义为收发分置条件下目标在不同空间方位散射声波的能力。在真实湖海态势下,水下目标的多基地声散射空间指向性复杂,即 STS 会随着声波入射角、分置角等空间方位参数而变化。忽略这一事实会导致对多基地系统有效探测范围的预报产生显著偏差,进而影响战术部署与决策可靠性。因此,开展考虑目标空间方位声学特性的探测研究,是推动多基地声纳从理论模型走向精确化、实用化的一个关键环节,对于提升我国水下预警与反潜作战效能具有重要的军事与现实意义。

综上所述,本文的研究意义为:突破传统多基地系统模型将 TS 视为与空间方位无关的固定常数局限,提出一种能够动态反映声学特性空间变化规律的多基地探测性能评估方法,以实现多基地声纳系统在不同节点配置与目标态势下探测概率和作用范围的更精确预测。

1 多基地探测范围修正原理与方法

1.1 双基地等效探测距离

对于多基地声纳系统的研究通常从几何结构相对简单的双基地声纳系统开始。双基地声纳是一种协作式声纳系统,其核心特征在于采用收发分置的布置,这使得发射基地、目标与接收基地之间构成一个三角几何关系,其基本几何构型如图 1 所示。

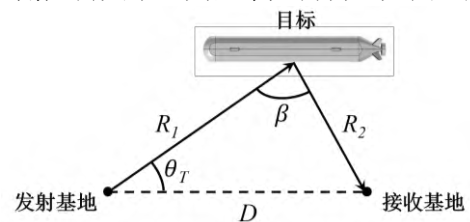


图 1 双基地声纳几何构型

图中,发射基地即为声源,它可以只工作在发射状态,仅负责向水中发射声信号以探测目标,也可以在收发合置模式下工作,即兼具发射信号与接收回波的功能。接收基地与发射基地保持一定的距离,仅负责被动接收信号。由于其位置的隐蔽性,接收基地在对抗中不易被敌方发现。 D 定义为基线长度,即发射基地与接收基地之间的直线距离。 R_1 与 R_2 分别表示从发射基地到目标和从目标到接收基地的声波传播距离。 θ_T 为发射波束的指向角。 β

为分置角，定义为发射基地到目标连线与目标到接收基地连线之间的夹角。

在水声学中，声纳方程是将声学介质、目标声学特性与设备参数相互关联的核心工程数学模型，其重要功能之一是对已有或设计中的声纳系统进行性能预报。对于背景干扰主要来源于环境噪声的场景，双基地声纳方程可表述为：

$$DT = [SL_T - (TL_1 + TL_2) + TS(\theta_T, \beta)] - (NL - DI)$$

可以看出，其在形式上与单基地声纳方程类似。声源级 SL_T 与接收指向性指数 DI 仅取决于声源和接收水听器本身，与基地配置情况无关，且环境噪声级 NL 在单/多基地条件下也无本质区别。然而，在双基地条件下，声波经历的总传播损失是声源至目标路径的损失与目标至接收基地路径的损失之和。由于两条传播路径的距离及途经介质的吸收特性可能不同，因此单基地方程中的传播损失 $2TL_0$ 需分解为 $TL_1 + TL_2$ 两项。此外，在单基地中，目标强度 TS_0 特指收发合置情况下目标反射声波的能力^[17]，其表现为距目标 1m 处的声源方向上，回波声强与入射声强的差级，而在多基地探测系统中需将其扩展到任意方位，可用 STS 来定义。由于其值并非恒定，而是取决于目标的类型以及入射角、姿态角等空间方位参数，因此本文在双基地声纳方程中用 $TS(\theta_T, \beta)$ 表示。

为量化比较双基地与单基地系统的探测性能，假设二者 SL_T 、 NL 、 DI 及所需检测阈 DT 均相同。在此前提下，可得单/双基地声纳方程在满足相同检测条件时的关系：

$$TS(\theta_T, \beta) - TS_0 = (TL_1 + TL_2) - 2TL_0 \quad (1)$$

其中，声波传播损失采用球面扩展叠加海水吸收模型考虑，可表示为：

$$TL = 20\log_{10}(R) + \alpha R \quad (2)$$

其中， R 为声波传播距离， α 为海水吸收系数。为聚焦几何效应的影响，本文在理论推导阶段暂未考虑海水吸收项。需要强调的是，在实际计算中， α 必须依据实际频率与海况准确设定，否则将导致探测距离的高估。本文在后续的大范围水域仿真计算中已完整纳入海水吸收损失。

将式(2)代入式(1)，可得：

$$TS(\theta_T, \beta) - TS_0 = 20\log_{10}\left(\frac{R_1 \cdot R_2}{R_0^2}\right) \quad (3)$$

其中， R_0 为单基地情况下声纳到目标的距离， R_1 、 R_2 分别表示双基地情况下发射基地、接收基地到目标的距离。对式(3)进行整理，可得

$$R_1 \cdot R_2 = R_0^2 \cdot 10^{\frac{TS(\theta_T, \beta) - TS_0}{20}} \quad (4)$$

现有研究通常假设 TS 无方向性，则式(4)简化为 $R_0 = \sqrt{R_1 \cdot R_2} = \text{const}$ 。该式定义的几何轨迹即为卡西尼卵形线，其为传统双基地探测范围的理论边界，如图 2 所示。此时，探测范围完全由假设的 TS 值决定：当 TS 较大时，有效探测范围对应红色曲线所围成的卵形区域； TS 中等时，范围收缩为绿色曲线构成的伯努利双纽线区域； TS 较小时，则退化为蓝色曲线表示的双叶形区域。

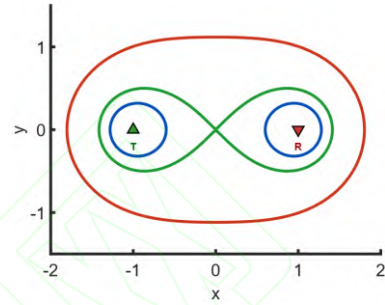


图 2 双基地声纳经典探测范围：卡西尼卵形线

而当考虑 STS 的空间指向性时，修正后的双基地等效单基地探测距离 R_e 为：

$$R_e = \sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot 10^{\frac{TS(\theta_T, \beta) - TS_0}{20}}} \quad (5)$$

式(5)表明，等效探测距离是几何位置与 STS 共同作用的结果。获得此等效距离后，即可借助已发展成熟的探测概率模型，进一步评估双基地系统的探测性能，从而将目标声散射特性研究与双基地系统效能分析有效结合。

1.2 探测概率模型

在双/多基地声纳系统的效能评估中，覆盖范围是衡量其探测能力的关键指标之一。探测距离或覆盖区域的界定通常依赖于对目标的检测概率。因此，在通过前文方法获得双基地等效单基地探测距离 R_e 后，需在此基础上进一步将其映射为对应的探测概率 P_d 。

在工程应用中，接收机工作特性曲线(Receiver Operating Characteristic Curve, ROC)作为描述检测概率与虚警概率之间关系的标准工具，基于噪声统计特性与信号能量的联合分析，能够在给定虚警概率条件下精确刻画系统的检测性能。同时，考虑到计算上的简便性，费米函数因其形式简洁、参数物理意义明确而被广泛采用^[18-19]，其表达式为：

$$P_d = \frac{1}{1 + 10^{-(R_e/R_0 - 1)/b}} \quad (6)$$

其中， R_0 为 50% 探测概率所对应的距离； b 为扩散系数，用于表述探测概率过渡区域的宽度。这两个

物理参数均可通过 ROC 理论进行标定,该关联性使得费米函数能够作为一种简化工具,在保留主要物理特征的前提下实现对探测范围的快速评估,因此本文在后续仿真阶段将采用费米函数探测概率模型进行数值计算。

1.3 多基地系统探测效能的量化评估

前文分析的双基地系统可视为多基地系统的一种基本构成单元或特殊形式。从双基地到多基地的扩展可通过逐步增加节点数量来实现。以最简单的扩展为例:在“一发一收”双基地构型的基础上,增设一个接收基地,即可构建“一发两收”的多基地系统。

对于一个由多个发射基地与接收基地组成的多基地系统,评估其整体探测效能的核心在于计算网络融合探测概率,其定义为:目标位于空间某一点时,网络中至少有一个“发射-接收”节点成功探测到目标的概率。该计算基于一个基本假设,即各节点的探测事件在统计上相互独立。因此,多基地融合探测概率 P_{total} 可通过下式计算:

$$P_{total} = 1 - \prod_{i=1}^M \prod_{j=1}^N (1 - P_d^{ij}) \quad (7)$$

其中, M 、 N 分别表示发射基地与接收基地的个数, P_d^{ij} 为第 i 个发射基地与第 j 个接收基地构成的节点探测到目标的概率,其值已通过将双基地等效距离 R_e 代入费米函数模型而获得。

2 收发分置下空间目标强度实验验证

首先通过开展实心球目标的收发分置实验,对前文提出的 STS 概念进行验证。实验在尺寸为长 1m × 宽 0.6m × 高 0.6m 的水箱内进行。实心球目标由聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)制成,其材料参数为:密度 $\rho = 1190\text{kg/m}^3$,横波波速 $c_T = 1340\text{m/s}$,纵波波速 $c_L = 2690\text{m/s}$ 。目标直径 $d = 0.03\text{m}$ 。实验测试采用中心频率为 500 kHz 的 CW 脉冲信号,脉宽为 0.04 ms,发射间隔为 10 ms。为提升信噪比,对 32 次测量结果进行了平均处理。实验系统中各设备的布放示意图如图 3 所示。

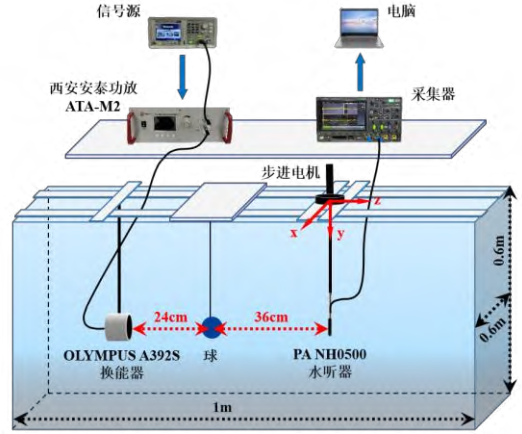
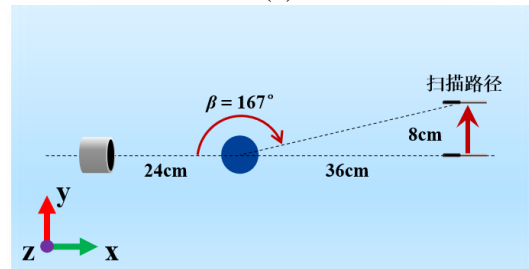


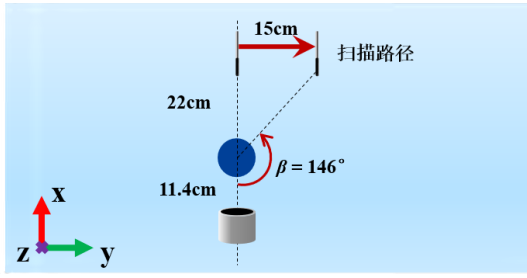
图3 实验设备布放图

发射换能器通过不锈钢支架固定;水听器安装在碳纤维杆上,该杆由三自由度步进电机驱动,可在 x 、 y 、 z 方向上精确移动,移动步长与扫描点数均可预先设定;球形目标使用细渔线垂直悬挂于水中。正式采集前,需进行系统校准与目标对齐:首先固定换能器,驱动水听器在 y 和 z 方向进行线性扫描,通过寻找声压最大值确定接收位置,并将水听器移动至该点。接着,调整球形目标的悬挂高度,使其与换能器、水听器处于同一水平面。最终经测量,换能器与目标距离为 24cm,目标与水听器距离为 36cm。

受限于水箱的物理尺寸,实验分为两次测量以获得尽可能大的分置角范围。在第一次测量中,设置水听器沿 x 方向移动,步长为 1 mm,选择线性扫描开始正式采集,等待水听器接近水箱边界时终止采集,共前进 80 步,该次扫描路径及其对应的分置角换算如图 4(a)所示。第二次测量旨在进一步扩展分置角范围,在确保满足声学远场条件的情况下,沿着水箱的 x 方向重新布放换能器、目标以及水听器。经测量,换能器与目标距离为 11.4cm,目标与水听器距离为 22cm。此次测量设置水听器沿 z 方向移动,步长保持 1 mm,共前进 150 步,对应的扫描路径与分置角换算如图 4(b)所示。



(a) 第一次测量



(b) 第二次测量

图4 扫描路径与分置角换算

数据采集分为两个阶段：总声场测量与背景场测量。在得到包含目标散射声压的总声场声压后，将目标移出水体，随后在完全相同的扫描路径下再次采集，获得背景声压场。将两者对应点位的声压信号相减，即可分离出目标的散射声压场。随后对散射声压信号进行后续处理。首先进行希尔伯特变换提取信号包络，再根据回波时延进行动态加窗以隔离目标回波，并且计算窗内信号幅值的平均值。结合水听器每个点位对应的目标距离与分置角，计算各方位下的 *STS*，最终生成 *STS* 随分置角变化的极坐标图。完整的实验与数据处理流程如图 5 所示。

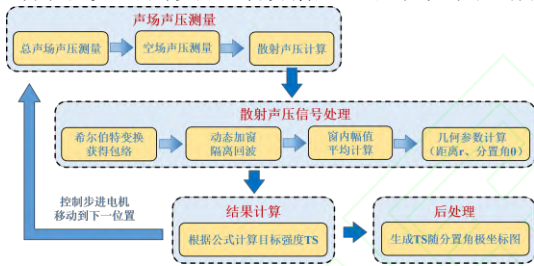
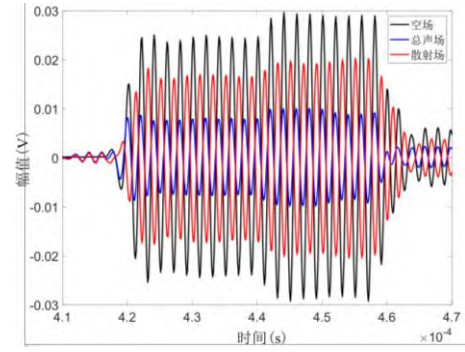


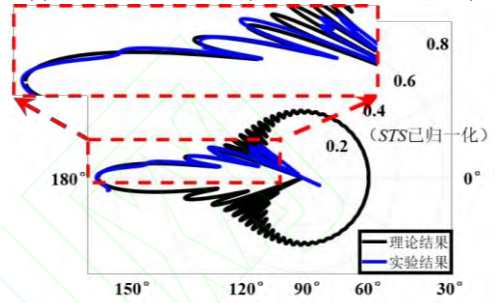
图5 实验信号处理流程

500 kHz 频率信号在 180°分置角下的背景声场(无目标)、总散射场和纯散射场的时域图如图 6(a)所示。实验测量绝对值结果与理论相差 3dB 左右，这主要是由于水箱中的远场条件未能完全满足，需进行相应修正^[9]。将实验测量的 *STS* 经归一化处理与基于简正级数法的理论解相比，发现实际有效采集数据对应的分置角范围为 146°至 180°。该范围内实验测得的 *STS* 值与理论结果的对比如图 6(b)所示。可以看出，当分置角在 154°至 180°区间内时，两者呈现良好的一致性，最大误差仅为 5%，这验证了 *STS* 仿真预报和实验测量的准确性，并为本文所提出的考虑目标方位声学特性的多基地探测模型提供了直接的实验支撑。然而，在 146°至 154°范围内，实测 *STS* 值会出现急剧下降，与仿真结果存在明显偏差，最大误差约为 30%。初步分析表明，误差的产生主要源于以下两方面因素：其一，在水听器进行大角度扫描过程中，步进电机的定位精度可能引入微小偏差；其二，当水听器接近水箱边界时，

侧壁反射或衍射效应对测量声场造成了干扰，导致在分离目标纯散射波时出现误差。



(a) 实验信号时域图(500kHz、180°分置角)



(b) 理论与实验目标强度对比(归一化后结果)

图6 实验结果分析

受制于现有实验水箱的物理尺寸，当前仅能在有限的分置角范围内获取有效数据，且并未考虑真实湖海态势下的背景噪声以及混响等因素，将于后续实验逐步开展。后续研究拟采用更大尺度水池或开展外场试验，以实现更宽分置角范围内的全方位测量。同时，将逐步开展有限长圆柱体、潜艇缩比模型等更具工程意义的目标实验，以进一步验证所提模型的普适性与鲁棒性。

3 多基地探测概率仿真计算

3.1 声学特性数据库构建

为精确而全面地获得目标的全方位声散射特性，本节采用 COMSOL Multiphysics 仿真平台，并基于边界元法(Boundary Element Method, BEM)与板块元法(Planar Element Method, PEM)对目标声散射过程进行数值模拟计算。在仿真中设置自由场声学环境以排除边界干扰，发射信号为频率 25kHz 的 CW 信号，球形目标半径设定为 0.03m。由于球形的几何对称性，其散射特性与入射角无关，而仅随分置角变化。在计算中，对分置角进行了高分辨率的全方位扫描，以构建完备的 *STS* 数据库，并验证了数值计算所得结果与理论解一致。

为评估该声学特性在实际探测场景中的影响, 设定一个 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的矩形水域作为仿真区域。发射基地与接收基地分别固定于坐标 $(-20\text{m}, 0)$ 与 $(20\text{m}, 0)$ 。将该水域离散化为密集的二维网格, 对于每一个网格点(即目标的潜在位置), 均可根据其 与两个基地的几何关系, 确定对应的入射角、散射角以及传播距离。通过调用检索前述构建的 *STS* 数据库, 即可映射得到目标位于该网格点时所对应的声学特性, 结合式(5)与式(6)即可得到该态势下的探测概率。最后, 融合了球形目标空间方位声学特性的双基地探测概率分布计算结果如图 7(a)所示。作为对比, 传统恒定 *TS* 假设下的卡西尼卵形线边界如图 7(b)所示, 单基地情况下的球形目标探测概率分布如图 7(c)所示。

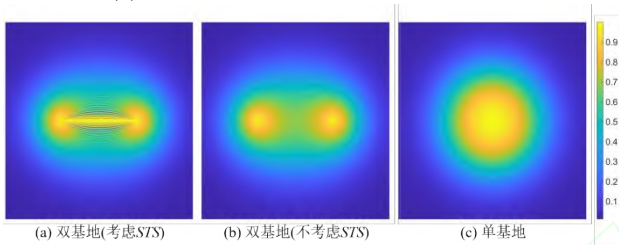
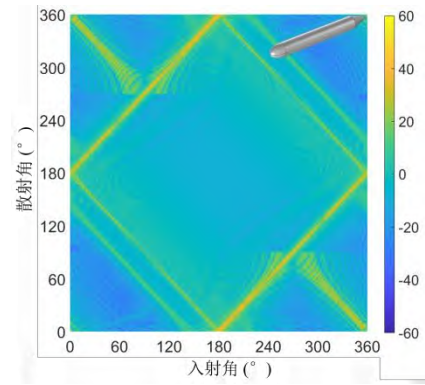


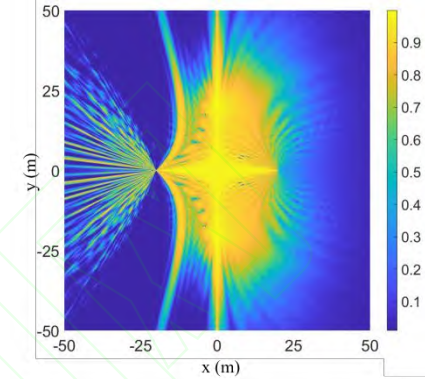
图7 球形目标的探测概率分布对比

在图 7(a)中, 中心区域的明亮部分对应方位角为 180° 时的前向散射主瓣, 而上下两侧的细条纹则对应于其他方位角下的散射旁瓣。可以看出, 在相同的参数配置下, 单基地与双基地系统的探测范围存在明显区别, 但双基地探测具有前向远距离探测的优点(即优势区域)^[4]。此外, 考虑目标空间方位声学特性后的探测概率分布, 与经典卡西尼卵形线所描述的双基地理论探测边界也存在着显著差异。

借助上述思路, 可进一步推广至其他典型水下目标, 构建其声学特性数据库, 并基于空间目标强度分布, 获取双基地(基站固定)配置下的探测概率分布, 例如 *Benchmark* 标准模型等。在建模过程中, 为简化计算并聚焦主体结构对声散射的贡献, 可去除对目标强度影响较小的附体结构, 如围壳、舵翼、推进器等, 从而提取目标的主体部分作为研究对象。与球形目标不同, 由于此类目标不具备全方位空间旋转对称性, 其散射特性会随着入射角的变化而显著改变。因此, 需首先构建其在全入射角与全散射角组合下的目标强度数据库, 发射信号为频率 5kHz , *Benchmark* 模型的数据库如图 8(a)所示。在此基础上, 融合 *Benchmark* 模型目标空间方位声学特性的双基地探测概率计算结果如图 8(b)所示。



(a) 全入射角、散射角下的目标强度



(b) 双基地探测概率

图8 *Benchmark* 模型空间方位变化特性

从图中可以看出, 由于 *Benchmark* 目标的前向散射强度明显高于背向, 其前向散射主瓣区域呈现出显著的高探测概率特征。同时, 目标正横方向因几何镜面反射效应亦具有较高的目标强度, 因此对应的正横镜面反射区同样形成高探测概率区域, 其概率值随探测距离增加而逐渐衰减。此外, 在其他目标强度较高的空间方位上, 探测概率分布也呈现出与目标强度空间分布高度相关的规律性特征。

总体而言, 探测概率的高值区域与目标强度的空间分布主瓣及强散射方位具有良好的对应关系, 将双基地探测范围近似视作卡西尼卵形线^[14-16]将会对多基地系统的实际工程应用带来较大的误差影响。

3.2 多基地声纳系统探测概率

根据 1.3 节所述方法, 可进一步将双基地探测概率拓展到多基地探测概率, 以支持远距离、大范围反潜探测任务。在此应用背景下, 假设发射信号频率降低至 5kHz 左右, 以适应中远距离声传播中由海水吸收与扩展损失所主导的衰减特性, 从而保障探测效能。以球形目标为例, 考虑在 $100\text{km} \times 100\text{km}$ 的矩形水域中, 多基地系统配置为 5 发 5 收, 发射基地分别位于 $(0, 0)$, $(25\text{km}, 0)$, $(-25\text{km}, 0)$, $(0, 25\text{km})$, $(0, -25\text{km})$, 接收基地分别位于 $(0, 0)$,

(40km, 40km), (40km, -40km), (-40km, 40km), (-40km, -40km), 此时共形成 25 组双基地探测对, 将每一组探测对在每一个网格点的探测概率按式(7)进行融合计算, 可得到球形目标的多基地探测概率分布如图 9 所示。

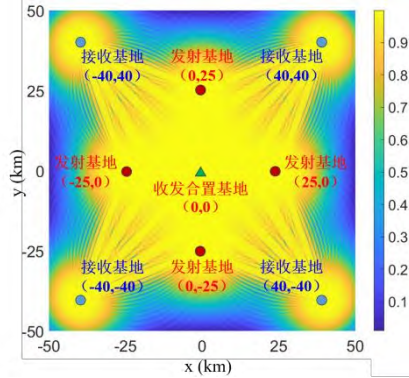


图 9 球形目标的多基地探测概率分布

将探测概率大于 50% 的区域定义为有效探测覆盖范围, 仿真结果表明, 在 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 的矩形水域内, 系统的有效覆盖率可达 90.2%。该结果说明, 在此布阵配置下, 系统借其空间分集与多角度探测的优势, 能够对绝大部分监视区域实现可靠覆盖, 显著提升了系统的整体探测效能与区域监视能力。

为进一步探究多基地布阵方式对探测范围的影响, 并直观展示覆盖率随布阵形式的变化趋势, 在 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 的矩形水域内构建了一发三收的多基地探测系统。在保证各接收基地与发射基地间距相等的条件下, 分别设计了 Y 字型布阵与正方形布阵两种典型构型进行对比分析。Y 字型布阵下, 发射基地位于 (0, 0), 接收基地分别位于 (0, 40km), (-32km, -24km), (32km, -24km), 该构型下的探测概率分布如图 10(a) 所示, 系统的有效覆盖率为 22.33%。正方形布阵下, 发射基地位于 (-20km, -20km), 接收基地分别位于 (-20km, 20km), (20km, -20km), (20km, 20km), 该构型下的探测概率分布如图 10(b) 所示, 系统的有效覆盖率为 21.08%。

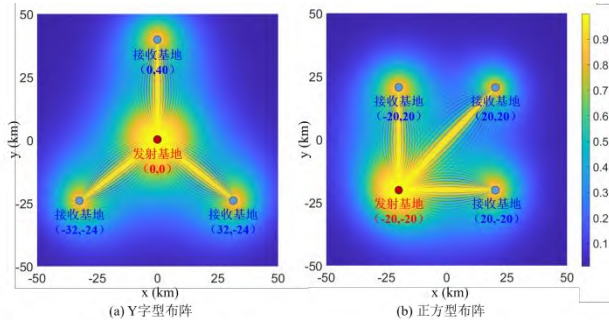


图 10 典型布阵构型的多基地探测效能对比

上述结果表明, 布阵几何形式对多基地系统的覆盖性能具有不可忽略的影响。在考虑 *STS* 变化特性的前提下, 如何优化发射基地与接收基地的协同部署位置, 以最大化系统有效覆盖率, 是后续研究中值得深入探讨的关键问题。

4 结论

本文针对传统的多基地声纳模型将目标强度视为方位无关的常数, 与实际目标声散射特性各向异性不符的问题, 开展了深入的理论、仿真与实验研究, 得到如下主要结论:

1) 理论方法层面, 提出并建立了一种融合目标空间方位声学特性的多基地探测性能修正评估方法。核心思想是一种双基地等效探测距离动态修正算法, 其通过将随入射角、分置角动态变化的 *STS* 函数与经典声纳方程相结合, 实现了对恒定 *TS* 假设下传统卡西尼卵形线探测边界的修正。

2) 实验验证层面, 区别于 Heather 与 Philip 的 0 至 20° 小分置角的收发分置实验^[13], 本文进一步在 146° 至 180° 的大分置角范围内获得了实心 PMMA 球目标的前向声散射声场数据。实验测得的目标强度随分置角的变化趋势与理论计算结果吻合良好, 验证了 *STS* 仿真预报和实验测量的准确性, 为后续开展多基地探测实验验证奠定基础。

3) 仿真计算层面, 基于 COMSOL 与 MATLAB 平台, 成功构建了自由场球形目标的高精度全空间声散射特性数据库。仿真结果表明, 考虑目标方位特性后, 探测概率的空间分布与经典卵形线边界存在显著差异。另外, 多基地系统的仿真结果进一步表明, 节点布阵的几何方位对系统有效覆盖率具有较大影响, 凸显了布阵优化的重要性。

本文证实了 *STS* 的空间各向异性是多基地声纳探测性能评估中不可忽略的关键因素。所提出的修正方法从理论、仿真到实验均得到了验证, 能够为真实湖海态势下多基地声纳系统的优化布阵、效能精准预测与战术决策提供更为可靠的理论基础和技术支撑。但当前工作未将海洋环境噪声与主动声纳混响的影响纳入模型, 将在后续逐步展开研究。在混响建模方面, Harrison^[20]在考虑混响影响的情况下, 提出了一套用于快速计算双基地声纳系统信号与混响比的解析公式与方法, 从而在系统设计优化与实时战术规划之间建立了有效衔接。在目标 *STS* 计算方面, 单志超等^[21]对长度 90m、直径 10m 的目

标进行了双基地目标强度仿真, 并比较了不同浮标阵的探测能力, 但未对双基地等效探测距离进行修正, 且其仿真结果尚需实验验证。在多基地布阵优化方面, 付留芳等^[22]通过改进算法实现了多基地声纳节点数量的确定与全覆盖部署优化, 但基于的模型仍是卡西尼卵形线近似探测范围, 未考虑 STS 对探测范围的影响。

在上述工作基础上, 本文后续工作将围绕考虑背景噪声与混响情况下更多目标的散射特性、基于覆盖率的实时布阵优化算法、多基地效能评估方法更新、混合神经网络多基地节点优化布置等方面进一步开展研究。

参 考 文 献

- [1] 黄海宁, 李宇. 水声目标探测技术研究现状与展望[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(03): 264-271.
- [2] 邹吉武. 多基地声纳关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [3] 徐海信. 海洋环境中双基地声纳探测范围研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2018.
- [4] 杨丽, 蔡志明. 双基地声纳探测范围分析[J]. 兵工学报, 2007, 28(7): 1000-1093.
- [5] 杜向辉, 王永恒, 刘亭. 航空声纳浮标多基地探测阵型性能分析[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(12): 140-146.
- [6] ZHOU Z L, FANG E Z, YIN X Z, et al. Detection performance analysis of multistatic sonar system based on cumulative detection[C]// 2021 OES China Ocean Acoustics (COA). China: Harbin, 2021: 601-608.
- [7] Fewell M P, Ozols S. Simple detection-performance analysis of multistatic sonar for anti-submarine warfare[R]. Edinburgh: DSTO, 2011.
- [8] Blondel P, Pace N G. Bistatic sonars: sea trials, laboratory experiments and future surveys[J]. Archives of acoustics, 2009, 34(1): 95-109.
- [9] 郝雅, 程玄, 李宇坤, 等. “虎鲸”超大型无人潜航器目标强度特性研究[J]. 中国舰船研究, 2025, 21(2): 1-13.
- [10] 王成. 双/多基地主动声纳目标特性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- [11] 冯雪磊, 李晓伟, 李锦, 等. 基于改进板块元法的标准潜艇收发分置目标强度分析[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(3): 234-241.
- [12] Fischell E M, Schmidt H. Multistatic acoustic characterization of seabed targets[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 142(3): 1587.
- [13] Heather A M, Philip L M. Using quasi-holographic backpropagation to understand high-frequency scattering from curved elastic objects in water[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2026, 159(3): 2579-2590.
- [14] 王兆弘, 张晶晶. 基于水下无人平台的多基地水声探测效能研究[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(15): 130-134.
- [15] 陈立纲. 声纳浮标多基地探测综合效能分析方法研究[J]. 声学与电子工程, 2022, (02): 7-9.
- [16] 鞠建波, 郁红波, 单志超, 等. 舰机双基地协同主动声纳探测范围分析[J]. 指挥控制与仿真, 2021, 43(01): 19-23.
- [17] 汤渭霖, 范军, 马忠成. 水中目标声散射[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [18] Urick R J. Principles of underwater sound[M]. McGraw-Hill Book Company, 1983.
- [19] 李迪, 赵海潮, 张颜岭. 基于 TAP 目标强度模型的浮标双基地探测研究[J]. 声学与电子工程, 2020, (03): 4.
- [20] Harrison C H. Fast bistatic signal-to-reverberation-ratio calculation[J]. Journal of Computational Acoustics, 2008, 13(02): 317-340.
- [21] 单志超, 崔双月, 董彩萍, 等. 多基地声纳浮标探测能力分析[J]. 海军工程大学学报, 2025, 37(04): 79-85.
- [22] 付留芳, 许林周, 周明, 等. 基于二次优化的 T-R~n 型多基地声纳部署方法[J]. 系统工程与电子技术, 2025, 47(05): 1600-1608.