中国科学: 信息科学 2016 年 第 46 卷 第 8 期: 1053–1085
SCIENTIA SINICA Informationis
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS
信息科学与技术若干前沿问题评述专刊

海洋信息获取、传输、处理及融合前沿研究评述

徐文[①⑧*], 鄢社锋[②], 季飞[③], 陈景东[④], 张杰[⑤], 赵航芳[①], 陈戈[⑥], 吴永清[②], 余华[③], 张歆[④], 许肖梅[⑦], 陈惠芳[①]

① 浙江大学信息与电子工程学院, 杭州 310027
② 中国科学院声学研究所, 北京 100190
③ 华南理工大学电子与信息学院, 广州 510641
④ 西北工业大学航海学院, 西安 710072
⑤ 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061
⑥ 中国海洋大学信息科学与工程学院, 青岛 266100
⑦ 厦门大学海洋与地球学院, 厦门 361005
⑧ 中国科学院深海科学与工程研究所, 三亚 572000
* 通信作者. E-mail: wxu@zju.edu.cn

收稿日期: 2016–03–26; 接受日期: 2016–06–01
国家自然科学基金 (批准号: 61531017, 61431020, 61431005, 61531015, 61531018, 41376104) 资助项目

摘要 海洋信息的获取、传输、处理和融合, 不仅在海洋科学研究、环境调查、资源开发、权益维护与安全防卫中发挥重要的作用, 也因其应用环境的特殊性而成为信息科学研究的热点之一. 海洋信息技术近 30 年的发展分享信息理论的丰富成果, 同时突显出传播物理、信号处理以及海洋环境的紧密关系, 这种结合在其他信息领域较为少见. 本文主要关注海上目标探测、识别理论及方法; 水下目标探测机理和识别方法; 水下通信与海空一体信息传输; 海洋环境遥感遥测理论与方法; 海洋数据处理与信息融合方法与技术等. 旨在通过对海洋信息获取、传输、处理和融合前沿研究的评述, 凝练若干海洋信息关键科学问题, 为我国海洋信息基础理论与方法的发展提供思路.

关键词 海洋信息 目标探测 水声通信 合成孔径 声纳 雷达 像形成 信息融合

1 引言

海洋信息技术涉及海洋信息的获取、传输、处理和融合, 不仅在海洋科学研究、环境调查、资源开发、权益维护与安全防卫中发挥越来越重要的作用, 也是信息科学研究的热点方向. 海洋信息获取通过光、声、电、磁等物理手段以及生物、化学等传感机制获取目标或海洋动力、生态、地质、气象等环境信息. 信息有线传输为海底光缆的方式, 无线传输在水面主要采用电磁波, 水下则主要依赖声波这一载体, 光波在特定环境条件下也有重要应用. 海洋信息处理包含时频分析, 信号滤波、增强、变换, 参数估计, 检测、定位、跟踪、识别、分类, 数据压缩, 场景成像, 系统辨识等几乎所有常规信息理论与方法研究的内容. 信息融合对从多个信息源获取的数据和信息通过融合算法进行关联、相关和综合, 以

引用格式: 徐文, 鄢社锋, 季飞, 等. 海洋信息获取、传输、处理及融合前沿研究评述. 中国科学: 信息科学, 2016, 46: 1053–1085, doi: 10.1360/N112016-00064

© 2016《中国科学》杂志社

得到目标和环境完整的状态和精确的判定, 以及进行快速全面的态势和场景估计. 随着现代传感器网络的发展, 海洋信息的获取、传输、处理和融合越来越以一种综合的方式呈现.

从表面的描述来看, 海洋信息似乎是信息理论与技术在海洋中的应用; 实质上因为这一应用环境的变化, 海洋信息技术有着许多与陆上不同的特点, 采用常规的信息方法无法获得预期的效果, 众多新的信息理论与方法正是在水下应用中得以滋生和发展. 以声波为例, 作为水下信息的主要载体, 海洋是 "声透明" 的, 声传播是水下信息感知、辨识和通讯的主要手段, 用作目标的探测与定位、海洋物理和生物现象的观察、海洋与地声参量的估计, 以及通信与数据传输等. 由于水下信道的复杂性, 迄今尚不存在成熟的水声相干通信产品, 水声通信网络的试验研究还极为有限, 正在吸引更多的通信领域学者. 水下目标探测面临着 "干扰强度为目标的 1000 倍、干扰数目为目标的 1000 倍" 这样的 "两个 1000" 问题, 正是 1973 年美国国防部资助的声纳信号处理系统项目开启了信息融合理论的发展. 声学方法作为水下目标和环境参数大范围测量的主要手段, 近三十年的研发历程凸显出水声技术与水声物理、信号处理以及海洋环境的紧密关系. 水声物理是水声技术的物理基础, 信号处理是水声技术的重要工具, 与海洋环境相匹配是水声物理与水声信号处理追求的目标 [1], 这种结合在其他领域较为少见.

海洋信息的发展与信息理论本身的发展几乎是同步的, 受到两次世界大战及冷战期间军事通信、探测技术发展的推动, 包括 Wiener, Blahut, Van Trees, Oppenheim 等在内的一批优秀科学家都从事过海洋信息处理方面的研究工作, 信号处理的几位大家如 Scharf [2]、Kay [3]、Poor 等 [4] 都与水声信号处理有缘, Scharf 更是以水声为背景完成他的博士论文 [5]. 20 世纪后半叶全球气候、生态环境变化对观测技术提出了极大的需求, 随着声纳、遥感、Argo 浮标、海底观测网等观测设备、系统的出现及其网络化, 信息技术更是渗透到了海洋科学研究及业务化监测的各个层面. 通过长期理论、技术、应用的积累, 美国在海洋信息领域建立起领先地位, 出现海军研究实验室、华盛顿大学应用物理实验室、麻省理工学院、Woods Hole 海洋研究所、Scripps 海洋研究所、Monterey Bay 海洋研究所等一批代表性研究机构. 欧洲、日本、澳洲的研究机构也有很强的实力. 我国近年来海洋信息技术取得长足进步, 中国科学院成立了海洋信息技术创新研究院, 但目前主要是信息技术在海洋中的应用, 采用信息理论系统地指导海洋观测尚不多见, 这在一定程度上反映了海洋信息理论基础研究较为薄弱.

本文主要关注海上目标探测、识别理论及方法; 水下目标探测机理和识别方法; 水下通信与海空一体信息传输; 海洋环境遥感遥测理论与方法; 海洋数据处理与信息融合理论与关键技术等. 旨在通过对海洋信息获取、传输、处理和融合前沿研究的评述, 凝练若干海洋信息关键科学问题, 为我国海洋信息基础理论与方法的发展提供思路. 第 2 节简要回顾海洋信息所基于的基础信息理论和方法. 第 3 节从海洋信息物理、信息获取、信息传输、信息处理及信息融合的角度, 分别对研究现状进行归纳和评述. 第 4 节概括领域若干典型科学问题. 第 5 节对全文进行总结.

2 基础理论回顾

海洋信息问题大体上可以概括为观察、通信与控制 3 大类问题, 本文关注观察与通信, 其理论基础在于以信息理论与估计理论为核心的信息学. 信息和物理构成我们存在的世界, 或称之为空间, 观察和通信问题研究通常是在探索信息 – 物理 – 空间的关系.

信息理论 (information theory) 或信息学 (informatics) 诞生于 Shannon 1948 年的一篇论文 "一种通信的数学理论" [6]. 早期 Wiener 和 Rice 先后将随机过程引入通信研究, Shannon 则首次提出信息熵的概念, 建立了 "信息即是在有限可能性之间做出选择的结果" 这一基本原则, 解决了数据压缩与可靠通信的基本限这一核心问题, 他并提出了信息熵 (entropy) 与统计力学中物理熵相对应, 与能量

(energy) 这个物理量相对应有信息力 (force) 和信息势 (Potential). 更进一步, Jaynes 1957 年在物理评论杂志上发表的论文直接将信息与物理并列在一个标题下: 信息理论与统计力学 [7], 并奠定了著名的最大熵方法的理论基础.

1998 年 IEEE 信息理论学报出版了纪念香农信息理论 50 年的专刊 [8], 对 50 年来信息理论的发展作了全面的回顾. Verdu [9] 在 "五十年的 Shannon 理论" 一文中总结了若干重要的思想, 例如通用信源编码中, 编码者可以观察信源输出, 学习信源分布, 进而适应它; 发射机的功能在于增加冗余度以对抗噪声; 正交复用的策略导致信道容量的损失, 引入可控的干扰可以增加容量. 这些理念对于水声信号处理的研究有着重要的指导意义. 专刊中其他论文则涉及到衰落信道信息理论方法、信道不确实条件下的可靠通信、信息理论与通信网络、编码理论、编码与建模中的最小描述长度原理、量子信息理论、数据压缩与谐波分析、量化、学习模式分类等.

估计理论可以说起源于 1795 年 Gauss 的最小二乘算法, 它是一种数学优化方法, 通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配, 利用最小二乘法可以简便地求得未知的数据, 并使得这些求得的数据与实际数据之间误差的平方和为最小. 现代估计理论的发展则归功于 Wiener [10], 他在第二次世界大战期间提出了线性滤波的理论和线性预测的理论, 奠定了关于最佳滤波器研究的基础. 假定线性滤波器的输入为信号和噪声之和, 两者均为广义平稳过程且知它们的二阶统计特性, Wiener 根据最小均方误差准则, 求得了最佳线性滤波器的参数, 在此基础上, 其他学者继续发展了基于最大输出信噪比准则、统计检测准则以及其他最佳准则的最佳线性滤波器.

Wiener 滤波要求信号和噪声都必须是以平稳过程为条件. 20 世纪 60 年代初, Kalman 和 Bucy [11] 提出了一种新的线性滤波和预测理论, 被称为 Kalman 滤波, 特点是在线性状态空间表示的基础上对有噪声的输入和观测信号进行时间序贯处理, 求取系统状态或真实信号. 这项工作为后续 Bayes 状态 – 空间处理框架奠定了基础, 在这一框架下, 模型 (先验知识) 与观测数据 (新息) 得到有机的统一, 并且从早先线性估计扩展到非线性估计 (如 unscented Kalman filter), 从单模态概率密度分布扩展到多模态概率密度分布 (如 particle-filtering), 极大地丰富了信号处理理论 [12].

历史上估计理论与统计推断有着紧密的联系. 例如现代统计科学的奠基人之一、英国统计学家、生物进化学家、数学家、遗传学家和优生学家 Fisher 提出了著名的 Fisher 信息矩阵, 被广泛应用于参数估计性能评估, 正是他率先提出了估计理论中的最大似然方法 [13]. 似然函数成为信号检测与估计理论的核心之一, 在纪念 Shannon 信息理论 50 年的专刊中, Kailath [14] 从两个方面总结了随机过程检测理论的重要进展, 其一即是噪声中信号检测的似然比结构. 他指出, "(虽然似然比检验的理论早已建立) 从工程的角度故事才刚刚开始……主要工程目标是从特定问题的数学解中获得对于结构的深刻理解, 希望这些理解能够用于智慧地调整数学解使其适应于特定的物理问题", 进而系统讨论了从匹配滤波器到 RAKE 接收机到估计 – 相关器再到最大似然序列检测的发展历程和思路. 文中还重点介绍了检测问题中的随机微积分和可再生核 Hilbert 空间 (reproducing kernel Hilbert space, RKHS) 方法.

空间的概念起源于公元前 300 年, 从基本的解析几何定义了两维 Euclid 平面和更一般的 n 维欧氏空间. 20 世纪初叶发展的 Hilbert 空间可描述为一个可能是无穷维的欧氏空间. 欧氏空间经常被要求 "约束 – 自由", 因为欧氏空间 "拥挤"; 按照希氏空间的观点, 可以 "自由 – 约束", 自由先于也大于约束, 因为希氏空间 "稀疏". 希氏空间和希氏空间方法研究主要涉及空间、算子和谱分析/像形成 [15]. 运算在空间中的算子的谱分解 (decomposition) 理论应用于可能是无穷维空间的可分离性 (separability) 和可分辨性 (resolution), 希氏空间的高维甚至无穷维, 为由算子的谱分解达到空间中的分离和分辨, 创造了先决条件. Fourier 变换、波方程、量子、小波变换和优化, 信号处理这 5 大方向都可以统一在希氏空间理论中 [16].

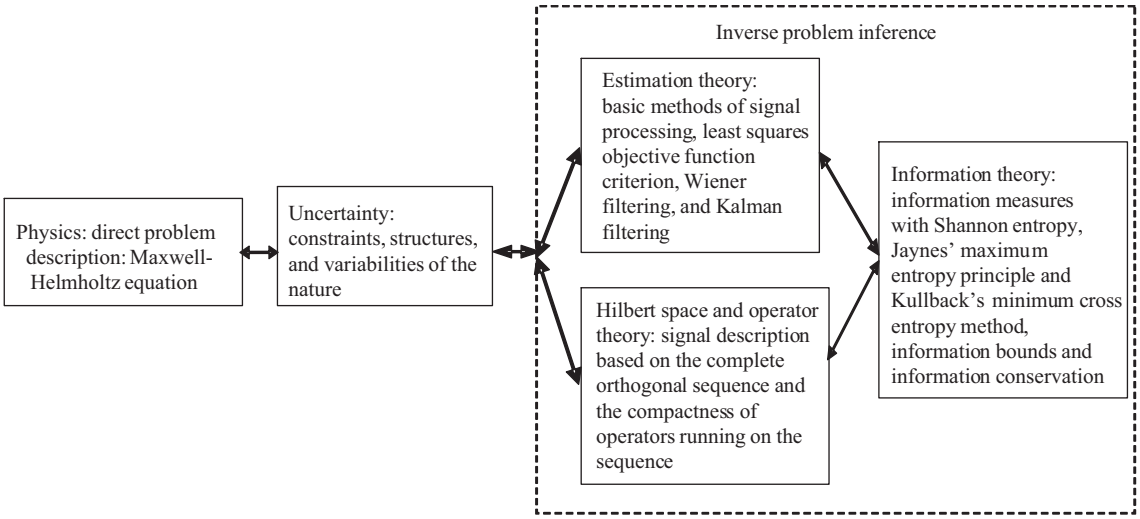

图 1　信息 – 物理 – 空间关系示意图

Figure 1　The relationship of information, physics and Hilbert space

信息的寄存和处理面对的物理问题可归结为传播物理, 即电磁波和声波逆散射 (inverse scattering) 理论 – 散射理论中的积分方程方法 [17]. Huygens-Fresnel 原理和 Maxwell-Helmholtz 方程正散射问题积分方程方法所描述的物理问题和 Hilbert-Schmidt 积分算子作运算的空间问题联合起来提供逆散射问题解. 具体讲来, 希氏空间中有一个特殊的空间 RKHS [18], 从而对应着一个通过积分核学习 (learning with kernels), 由前向拟合 (滤波) 获得逆散射问题解的 RKHS 方法.

信息与空间的联系是信号. 通 – 观 – 控要做的事即为提取深藏在信号中的信息, 实现对物理世界的 5 性: 可估计性 (estimability), 可检测性 (detectability), 可稳定性 (stabilizability), 可控制性 (controllability) 和可观察性 (observability). 典型信号为随机过程: 通信 —— 随机过程通信; 观察 —— 随机过程观察; 控制 —— 随机过程控制. 随机过程取空间描述. 各类算子作用于随机过程. 随机过程集某种意义的收敛、连续、可微、可积、微分方程及积分解和可供施展的各态历经性于一身, 而空间集代数结构、测度和几何结构于一身并体现直观与抽象, 发散与收敛关系. Cauchy-Schwarz 不等式与期望三角不等式支撑了空间的概念. 一个 RKHS 是一个希氏函数空间, 这个空间包含着一个核, 它可以通过一个内积再生空间中的每一个函数. 信息提取 – 问题解, 在于计算 RKHS 内积 [15].

信息 – 物理 – 空间的框架, 如图 1 所示, 从物理与信息两方面完备地描述了自然界; 估计理论, Hilbert 空间和算子理论以及信息理论构成 3 个基本元素, 对 3 个基本元素的新组合产生各种逆问题推断的理论限和基本信号处理方法. 信息 – 物理 – 空间的框架也使得观察与通信统一起来, 分享共同的信息理论宝藏. 在纪念 Shannon 信息理论 50 年的专刊中, O'Sullivan 等系统介绍了观察问题的信息理论像形成模型与方法 [19]. 目标源 – 传感器 – 介质 – 估计器 – 目标源再生, 代替了信息源 – 编码器 – 信道 – 解码器 – 信息源再生. 虽然这套理论还处于早期研究阶段, 已经可以作为像形成问题数据模型、性能测度及处理策略的基础, 有望在观测问题中发挥类似于 Shannon 源 – 信道模型在通信问题中的作用.

信息理论是何等丰富, 海洋信道又是何等深奥, 我们海洋信息工作者在深感幸运的同时, 不妨时常回到信息理论的本源, 在信息 – 物理 – 空间这一优雅的框架下从容应对海洋信息面临的诸多难题.

3 现状与趋势分析

3.1 水下目标探测

水下目标探测主要通过声学的手段, 可分为主、被动两种工作方式, 分别针对目标反射回波或者目标辐射噪声, 通过某些材料在电场或磁场作用下发生伸缩的压电效应或磁致伸缩效应实现声电转换 [20], 通常采用声基元阵列和时间相关运算来获得空间和时间的增益, 达到提高水下目标探测作用距离的目的. 同时为了能进一步提高检测信噪比, 在水下声传播利用以及背景噪声和混响抑制等方面也采用多种信号处理技术.

3.1.1 低频水声信道的传播特性

对于低噪声目标检测, 无论是主动还是被动工作方式, 所使用的频率都在向低端移动. 在文献 [21] 中, 将 1000 Hz 左右定义为中频工作频率, 100~1000 Hz 定义为低频工作频率. 目前主动工作频率已明显向低频/甚低频段移动, 其典型的代表是监视拖阵声纳系统 (Surveillance Towed Array Sonar System, SURTASS), 其工作频率已降至 100~500 Hz 之间, 而被动目标探测工作频率可低至 100 Hz 以下.

低频信号检测问题显然与低频信号在海洋中传播的问题紧密联系在一起, 只有从理论与实验中找出低频信号的传播特征, 才能为低频信号的检测提供依据. 俄罗斯的 Burenkov 等 [22] 在 1990 年曾对 228 Hz 低频信号的传播进行过试验, 其接收距离大于 9000 km. 美国的 Worcester 等 [23] 在一份总结多国参加的海洋气候声学测温 (Acoustic Thermometry of Ocean Climate, ATOC) 计划执行情况的报告中提到, 美国在 1995~1999 年之间利用美国海军的 14 个声学监视系统 (Sound Surveillance System, SOSUS) 接收阵, 记录 57 Hz 和 75 Hz 信号的传播数据, 最远距离为 3900 km, 单频信号的结果令人满意, 带宽为 1~2 Hz 滤波器提取的信息可以用于目标识别. 由此可见对低频信号进行检测的前景还是比较乐观的.

对水声信道传播特性的深入研究, 导致一些新现象的发现和新的信号处理技术的诞生, 特别指出的是模基探测技术和匹配场定位技术的研究工作 [24~26]. 同时, 浅海中的声波导现象有可能成为信号检测和目标识别的新途径. 例如波导不变量现象, 如果产生干涉条纹的频率正好和目标辐射噪声线谱分量相近或重合, 则有望大幅提高微弱信号的检测距离 [27,28].

3.1.2 传感器技术

近 20 多年, 水声场中质点振速信息的获取一直是受到广泛关注的理论与实际问题. 美国和前苏联学者率先开展了矢量水听器的研究 [29], 即利用矢量水听器获得水声场中除声压之外的质点振速信息, 并发展了相应的波束形成技术. 国内学者自 20 世纪 90 年代开始, 借鉴俄罗斯和乌克兰的矢量水听器技术, 对这种非声传感器以及光纤水听器展开研究. 从信号检测的观点来说, 无论是声学还是非声学传感器, 只要其自噪声远低于海洋噪声, 就可以用于对微弱信号的感知, 这是因为检测成功的决定因素之一在于是否具有足够高的信噪比. 当然, 声学传感器在水下目标探测中仍占主导地位, 特别是在拖曳线列阵声纳的应用中, 着重寻求一种电压灵敏度高、加速灵敏度低的小型、低频、宽带水听器 [30]. 德国船舶和海军武器装备技术中心专门建立了测试拖线阵流噪声的水池, 可以用于测量不同缆径、不同拖曳速度下的拖线阵流噪声, 我国也在湖上建立了类似的实验条件.

而对于中高频宽带声学换能器, 目前关注的技术主要有 3 大类: 一类是新型结构技术, 包括匹配层技术、纵弯复合技术、多模谐振技术等; 另一类是新型有源材料技术, 包括 1-3 复合材料和弛豫铁电

单晶材料; 还有一类则是通过有源材料的组合来获得宽带特性, 包括采用反转层压电材料等. 换能器带宽与有源材料的耦合系数息息相关, 为了提高换能器的带宽, 人们常常从有源材料入手. 新型 1-3 压电复合材料目前研究和应用较为广泛, 它是一维连通的压电陶瓷柱按一定规律平行排列于三维连通的聚合物基体中, 且压电陶瓷柱垂直于电极面而形成的两相压电复合材料. 基于 1-3 复合材料的周期特性, 可利用其一阶厚度振动模态、一阶对称横向模态的耦合来拓宽换能器带宽. 最新的方法是利用偶次模同时又通过电反馈调节偶次模大小的方法, 该方法电路复杂, 反馈点不易选取, 实现较困难.

3.1.3 主动探测

主动声纳是检测安静型水下目标、各种水雷目标的有效手段, 也是今后相当长一段时间内水下目标检测技术的一个主要发展方向. 浅海的工作环境对主动检测相当不利, 如何利用浅海信道、背景干扰和目标信号特征, 提高主动检测的稳健性一直是近年来的研究重点. 所开展的工作主要包括以下 3 个方面.

一是从信道响应角度提高主动探测的检测性能. 根据具体的海洋环境, 抓住影响探测性能的主要因素, 并采取有针对性的补偿措施. 例如在浅海信道中, 如果探测性能的下降主要是由于信道相干时间下降引起的, 可以采用分段拷贝相关器达到改善检测器性能的目的; 如果因多径传播引起的接收信号空间相干性下降是影响探测性能的主要原因, 也有相应的对策 [31]. 二是从背景干扰角度改善主动探测的检测性能. 在浅海波导环境中匹配滤波器性能下降的另一个重要原因是混响问题, 为提高检测器性能, 一条有效途径是选用参数合理、抗混响能力强的波形 [32]. 采用组合波形和波形融合处理, 综合利用各种波形的优点, 同样是提高主动远程探测能力的主要方法之一. 此外, 通过时间反转空时聚焦也可以达到混响抑制的效果, 但需要使用探查源或者虚拟出探查源 [33]. 三是从目标信号特征的角度改善主动探测、检测能力. 常规检测器基于信号能量, 对于目标信号的诸多特征没有加以利用. 探测、识别跟踪一体化方法是改善探测性能的有效途径, 它打破了原有水下信号处理中检测、分类和跟踪依次进行的工作流程, 将回波信号的波形特征以及目标的位置和运动状态等都用于检测. 分类置前检测 [34] 和跟踪置前检测 [35] 就是其中的两种. 分类置前检测是将检测问题同时看成是模式识别问题, 而跟踪置前检测则是对所有可疑的目标都进行跟踪, 根据行为、特征差异来区分真假目标.

此外, 各种融合检测也是未来主动探测的发展趋势之一. 随着新型发射换能器的不断出现, 发射信号将从目前的单一信号向组合信号方向发展. 组合信号不仅可以提高发射信号的能量, 通过信号融合处理, 还可以大大提高水下目标检测和跟踪性能. 而合成孔径处理可以说是一种空间的信号融合, 通过相干合成声纳在不同空间位置接收的信号, 显著提高探测分辨率, 并且理论上这一分辨率可以不随频率和距离而变化, 合成孔径声纳技术近 20 来年取得极大进展 [36].

3.1.4 水下目标特性及识别

国际上对水中目标识别技术十分重视, 在理论和实验方面均进行了长期不懈的研究. 多采用专家系统和模板匹配的方式进行水中目标识别, 且特征库已建到个体, 甚至可以识别到具体的型号, 已装备于现役声纳, 如美国 “海狼” 级攻击型核潜艇, “拉菲特” 级、“俄亥俄” 级弹道导弹核潜艇等分别装备 BQQ-SD 综合声纳系统、BQQ-3 目标性质识别声纳和 AN/BQQ-6 综合声纳系统. 从所采用技术手段分析, 目前的研究可以归纳为以下几点: 1) 基于目标信号物理机理的目标特征分析; 2) 水中目标精细特征提取; 3) 多传感器、多特征信息的融合应用.

具体而言, 在分析目标特征形成机理的基础上, 以最初的简单亮点模型为基础发展基于模型的特

征提取研究, 形成不同物理意义下的特征提取方法. 为满足时间敏感目标打击作战任务对目标自动识别的要求, 美国国防先进研究计划署制定运动与静止目标获取与识别研究 (Moving and Stationary Target Acquisition and Recognition, MSTAR) 计划. 俄罗斯也注重研究物理意义更为明确的特征提取技术, 把目标特征分成几种主要类型, 分别为: 噪声辐射频谱特征、目标参数、目标噪声辐射强度、接收信号的线谱结构以及各类目标的机动特点等.

基于信号分析的特征提取从时、空、频域以及各种变换域中进一步挖掘水中目标声信号精细特征. 采用 Merlin 变换 [37] 和 Walsh 变换 [38] 等方法提取回声信息, 甚至在能量检测的基础上提取目标回波中的相位信息 [39]. 澳大利亚研制了一种称为 SONEX 的被动识别专家系统, 主要提取目标的空化、深水压力空化、螺旋桨拍水声、螺旋桨共振声、机械摩擦声等精细特征.

此外, 国外注重多传感器、多特征信息的融合应用. 美国的林肯实验室是从事军事武器装备预先研究的重要机构, 在 2001~2007 年的研究计划中, 把多声纳综合信息系统、波束形成对信号特征的影响作为研究的重点. 这表明获取更丰富的目标特征信息, 并对信息进行融合是水中目标识别研究的一个重要发展方向.

3.1.5 被动探测

被动工作方式具有隐蔽性高、探测距离远等优点, 是对各类水下目标进行水声探测的重要手段. 在信号处理流程中, 目标信号检测通常位于前端, 是目标识别分类和定位的前提. 经过半个多世纪的发展, 被动检测从最初仅依靠模拟限幅相关特性的技术, 发展成为能够有效利用目标辐射噪声特性的技术, 基于噪声能量积分的检测法, 低频谱分析法 (low frequency analysis recording, LOFAR) 和基于噪声包络调制谱检测法 (demodulation on noise, DEMON) 是其中 3 种经典的方法 [40].

能量积分检测是宽带信号检测中常用的方法, 但是在复杂环境下, 这种检测器的性能迅速降低. LOFAR 谱图是根据水声目标辐射噪声的局部平稳特性, 通过信号短时 Fourier 变换获得的时变功率谱在时间、频率平面上投影形成的, 反映了信号的非平稳特性, 能够有效提取信号中的线谱分布特征. DEMON 方法是通过对接收的宽带高频端信号进行解调, 以计算低频调制谱的算法, 可获得低频端的强调制特征谱. 通过 DEMON 分析还可以获得诸如目标轴频、叶频等不变的目标物理场特征, 为目标的分类识别提供新手段. 随着降噪技术的发展, 水下目标的辐射噪声很容易淹没在环境噪声中, 上述传统方法性能会大幅下降. 针对这一问题, 人们进一步采用倒谱、瞬态短时谱以及小波子频带分析等现代信号处理方法对有用噪声信号进行增强, 对干扰噪声进行抑制 [41,42].

当水声传播使得声源信号发生扩展、延迟叠加等畸变时, 目标辐射声信号的特征可能发生改变, 导致被动检测方法失效. 海洋环境参数和水声传播信道响应可以通过主动探测的方式获得, 有效利用这些信息为上述问题的解决带来了希望 [43]. 3.1.7 小节中的模基信号处理是对水声传播信息有效应用的典范, 通过对这类方法的研究, 不仅可以去除水声传播对信号特性的影响, 还可以通过阵列处理增益提高对弱信号的检测能力, 具有较好的应用前景.

3.1.6 波束形成与空时自适应处理

波束形成是阵列信号处理中一项非常重要的任务, 其处理过程为采用空间分布的传感器阵列采集声场数据, 然后对接收的阵列数据进行线性组合处理得到标量输出, 该处理器称为波束形成器 [44].

最优的波束形成算法就是使得输出的信号与干扰加噪声的功率之比达到最大, 它可以看作一个空间滤波器, 使得感兴趣方向的有用信号通过, 而使得噪声和干扰的输出功率尽可能的小. 波束形成器

性能的优劣, 可以从如下几个重要性能指标来考察: 阵增益、稳健性、旁瓣级、主瓣宽度等. 波束优化设计就是在这些相互冲突的性能之间寻找最佳的折中, 设计出满足需要的、综合性能最优的波束形成器. 文献 [45] 给出几种期望主瓣响应波束设计方法和 FIR 波束形成器设计方法的分析, 针对阵形要求、设计精度、设计效果和计算时间等性能指标进行了比较, 归纳出一种窄带 (子带) 波束优化设计的统一方法 —— 多约束优化法, 将大多数现有窄带波束设计方法纳入统一框架.

已有的研究结果表明, 水下运动平台的浅海混响场由海洋的地层结构所控制, 具有特定的空时结构特性, 因此一种更好的混响抑制方法是使用二维滤波器在角度域和 Doppler 域进行联合滤波, 即空时自适应处理. 然而水下环境的声传播速度和信道带宽都很有限, 散射点的运动对混响回波波形的影响往往不能忽略, 即回波信号不仅在时宽受到压缩和扩展, 还会产生频率的调制和扩展, 所以雷达空时自适应处理方法在水下环境无法直接应用. 近年来, 空时自适应处理在主动探测的研究开始活跃起来, Mio 等 [46] 将空时自适应处理方法应用于主动低频目标探测中的混响抑制.

在数学描述上, 波束形成和空时自适应处理具有相同的最优化表达式, 不同之处是所用的导向矢量和协方差矩阵不同. 空时自适应处理可以看作波束形成的推广, 而波束形成可以看作空时自适应处理的特例. 在理想条件下, 波束形成和空时自适应处理都可以获得最优的性能, 然而实际应用中, 由于导向矢量和协方差矩阵误差的存在, 两者的性能将会不同程度地下降, 因此克服各种误差的自适应波束形成和空时自适应处理的稳健算法成为当前阵列信号处理的研究重点和难点.

3.1.7 模基信号处理

在水声信号处理中, 模基处理技术将环境 (传播、海底特性、海面特性、声速等)、测量 (基阵、投弃式温深仪等)、噪声 (环境噪声、船舶噪声、海面噪声等) 模型与测量数据相结合, 通过特定的处理算法估计模型参数, 并进一步实现对复杂海洋环境中目标的滤波 (信号增强)、检测、定位和跟踪等 [47]. 模基处理主要有 3 方面的优势: 第一, 它是递归的, 因此可以序贯地修正对声纳和环境参数的估计; 第二, 它可以包含系统和测量噪声, 这里的噪声不仅指声学噪声, 也包括模型参数的输入误差; 第三, 它的输出之一是新息序列, 可以在线测试模型与数据的匹配程度, 通过分析新息序列的统计特性评价处理器的整体性能.

20 世纪 80 年代以来, 在声信号处理中引入传播模型的一种备受关注的技术是匹配场处理, 其最初主要用于解决声源定位问题 [48, 49]. 然而, 匹配场处理对模型误差非常敏感, 存在所谓的 “失配” 问题 [50, 51], 包括环境、系统和统计失配 3 个方面. 大量研究旨在解决该问题, 例如 Richardson 等在匹配场处理算法中加入先验信息, 得到声源位置的后验概率密度函数, 用来表示未知声传播参数的不确定度 [52]. Candy 提出将传播模型嵌入 Kalman 滤波器中来解决失配问题, 也就是序贯 Bayes 滤波 [47]. 它可以将未知参数作为状态向量的一部分, 称为 “增广状态向量”, 随着新的测量数据的获得, 序贯滤波器可以不断估计和更新未知参数. Xu 等 [53, 54] 发展了系列匹配场处理定量误差分析方法, 对其在各种条件下的定位性能进行了综合评估, 并成功地进行了匹配场被动定位理论性能的实验验证, 实现了环境、声学、统计建模的有机统一. Baggeroer [55] 和 Sazontov 等 [56] 最近分别对匹配场处理进行了回顾、反思和展望. Baggeroer 特别强调了匹配场处理的效果跟使用条件和方式有很大关系, Sazontov 则主要讨论模型失配的影响及其应对方法.

模基信号处理的性能提升, 未来还有许多工作要做. 例如, 目前模基处理器的调谐过程主要依靠经验, 应该研究更稳健的自适应的调谐方法; 现有模基处理方法中的噪声模型大多比较简单, 随着噪声建模技术的发展, 模基处理方法的整体性能必将得到进一步提高; 现有的工作大多假设环境是距离无关的, 而实际的海洋环境是距离相关的, 如何将模基方法推广到距离相关的情况中也是亟待解决的一

个问题.

3.1.8 多基地探测

多基地探测工作方式由于其发射机与接收机分开配置, 使其具有许多与单基地系统不同的特点, 且在探测距离、节点隐蔽性和混响抑制方面具有较大的优势, 多基地系统的研究也引起国内外学者的广泛关注 [57,58]. 20 世纪 90 年代初, 西北工业大学赵俊渭等发表了关于多基地系统总体性能的论文 [59], 此后中科院声学所等多所国内高校与科研院所就多基地探测关键技术做了大量的理论研究工作, 包括多基地系统配置与定位性能、多址数据融合与目标跟踪算法、直达波干扰抑制、收发分置下的目标回波特性以及多基地同步技术等 [60,61].

近 20 年中, 以水声通信技术实现点对点连接为现实基础, 水下无线传感器网络 (underwater wireless sensor networks, UWSN) 作为无线传感器网络技术应用的一大分支, 给水声技术研究带来新的机会. 多基地探测已由过去的收发分置概念延伸和扩展到目前的网络化应用, 与以往岸基、固定式浮标、潜标平台相比, 水下传感网络节点一方面可以根据目标位置与态势的变化以不同方式灵活配置网络各节点的覆盖区域与拓扑结构, 能以较少的节点实现对目标区域的连续监测覆盖, 提高水下网络的整体效率; 另一方面, 借助于对目标不同散射面的独立观测, 通过接收信号联合处理获得空间 (角度扩展) 分集增益, 可有效抑制目标散射起伏以及水声信道对信号衰落和畸变的影响, 提高探测系统目标检测和参数估计的稳健性. 在获得上述优势的同时, 基于移动节点的水下无线传感网络也对目标探测技术提出了更高的要求: 首先, 水下节点受到体积限制通常不能配备大尺度换能器阵列, 即无法通过增大传感器阵列孔径来提高探测性能; 其次, 受到水声信道特性的影响, 水下分布式网络探测节点间信息传输可靠性低且带宽有限, 通常无法满足采样信号波形级的实时传输与共享, 给信号级融合带来困难; 最后, 水下移动节点存在的节点位置误差、时间同步误差等都会超过固定平台, 对水下协同探测方法的稳健性提出了更高要求.

3.2 海上目标探测

利用合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 图像可以对海上目标 (船只、溢油、冰/冰川等) 实行有效探测及跟踪, 现已发展成为复杂气候条件下海洋船只监视监测的主要技术手段, 在海洋经济和国防军事等方面发挥重要作用. 近年来, 随着高分辨率、短重访周期光学成像卫星的发射以及海洋超视距雷达的迅速发展, 基于光学遥感图像和海洋超视距雷达数据的海面目标探测技术亦得到迅速发展, 成为 SAR 海面目标探测技术的重要补充. 本节重点阐述基于 SAR 海面目标探测技术的发展现状, 同时也对光学图像和海洋超视距雷达数据的海面目标探测技术作简要介绍.

3.2.1 海面舰船微波散射特性

海面舰船目标电磁散射特性研究是通过电磁散射数值方法或解析近似方法, 分析舰船散射回波信号与雷达波长、入射角、极化方式以及舰船几何外形和姿态等关键因素的关系, 为舰船探测与分类技术提供一定的理论基础和分析依据.

对于工作在微波频段的雷达, 舰船不仅尺寸巨大, 而且结构复杂, 因此微波散射特征亦很复杂. 另外, 海面与目标之间的多次耦合, 进一步增加了舰船目标微波散射场的计算难度. 当前, Monte Carlo 法和电磁散射前后向迭代理论是舰船目标微波散射模拟的主要方法 [62], 但是利用计算电磁学精确模拟舰船目标的微波强度和极化特征时, 仍面临计算量大、耗时长的挑战.

在短波高频波段, 船只尺寸与电磁波波长相当, 目标处于谐振区, 船只姿态或航向的较小变化也会引起雷达后向散射信号的显著变化, 目前高频雷达目标特性计算仿真一般采用矩量法、时域有限差分等方法 [63], 此项研究对雷达的设计和运行至关重要.

3.2.2 海面舰船探测与识别

基于 SAR 图像的海面目标检测与识别. 舰船由于具有较强的回波能量, 在 SAR 图像上表现为强散射点, 因此 SAR 成为舰船检测的一种非常有效的手段. 近年来 SAR 舰船检测方法发展迅速, 一般可分为直接检测和间接检测两类. 其中直接检测方法主要有: 1) 基于灰度统计的舰船检测算法, 如基于海面相干斑噪声统计模型的恒虚警率检测算法; 2) 基于多分辨率的舰船检测算法, 如基于小波变换的方法; 3) 基于极化分解的方法, 如极化目标分解、极化时 – 频分析等 [64~66]. SAR 舰船目标间接检测方法是通过检测船尾迹来间接发现舰船目标的方法, 常采用 Radon 变换 [67] 或 Hough 变换 [68] 进行船尾迹提取. 船尾迹通常为较长的线目标, 在背景噪声较强、船目标比较小或 SAR 分辨率较低的情况下, 船尾迹特征往往比船只目标本身尺度更大、更容易检测. 但是, 若船只静止或尾迹未能被 SAR 系统观测, 该方法就不再适用.

随着 SAR 技术的发展, 高分极化 SAR 图像可用来进行海面目标的识别和分类. 近年来, RadarSat-2, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed 等高分辨率 SAR 传感器的成功运行, 极大地促进了 SAR 舰船目标参数提取与分类技术的发展, 基于高分辨率 SAR 图像的舰船识别与分类技术逐渐成为新的研究热点. 美国、欧盟、加拿大、日本、澳大利亚等国家都将海上舰船监测与识别作为重点发展内容, 国外先后启动的知名研究项目有 2003 年欧盟的空基海事交通检测、分类与识别 (Detection Classification and Identification of Marine Traffic from Space, DECLIMS) 项目 [69]、2005 年欧空局的海事安全服务 (Maritime Security Services, MARISS) 项目、德国宇航局资助的 DeMarine 项目 [70] 等.

基于 SAR 图像的舰船识别和分类属于模式识别问题, 在分类过程中, 相关特征参数的提取与分类器的选择至关重要. 根据所选取的目标特征参数, 分类算法可分为基于几何结构 (长、宽、长宽比、外表轮廓、舰船主轴)、散射特征 (散射重心、强散射点分布) 和极化特征 (极化比、极化分解) 的分类方法. 根据所选用分类器的不同, 可将分类方法分为模式匹配、神经网络识别、统计模式识别、模糊逻辑识别等方法 [71]. 然而, 在特征参数提取方面, 船只目标的散射场特征随雷达入射角、方位角以及船只自身姿态的敏感性导致目标特征提取、选择与描述复杂化, 这为获取稳定、有效的检测特征带来了挑战; 另外, 在数据库实现方面, 可供实验验证的样本数据过少也是限制 SAR 图像舰船分类技术发展的一个重要问题. 各类分类算法对于不同环境、目标及传感器也存在有效性、复杂性以及实时性的问题. 实际应用中, 常将多种特征与分类方法相结合, 以期达到更好的分类识别效果.

基于光学遥感图像的海面目标检测与识别. 光学遥感图像可获得较高的空间分辨率, 如 SPOT-5 卫星全色图像分辨率可达 2.5 米, IKONOS, Quickbird, GeoEye-1, WorldView-2 等卫星光学图像分辨率则小于 1 米. 因此, 在晴朗光照条件下, 较微波图像而言, 光学遥感图像中目标的细节特征更直观明显, 在海面舰船目标检测与识别领域具有自身优势.

近年来, 基于光学图像的海上目标检测与识别技术得到了快速发展 [72~81], 如欧盟第五框架 DECLIMS 项目中德国 Definiens 和法国 IRD 均利用光学遥感图像对海上舰船目标进行了探测 [73], 重点是实现船只目标与云、雾、浪等其他海上小目标的区分. 目前, 基于光学遥感图像的海面目标检测与识别技术多采用面向对象的视觉显著性检测算法 [74], 其主要检测思路为: 显著性参数选取、海陆分割、目标检测及分类识别等. 在显著性参数选取方面, 通常选用灰度、相关性、图像熵等参数进行目标和背景分割, 选用舰船目标的几何外形参数、纹理特征等进行分类识别 [75,76]. 在光学图像海陆分割方

面, 主要有基于港口先验信息的方法 [73]、阈值分割法 [77] 和区域生长法 [78]. 在光学图像海面舰船目标检测及分类识别方面, 主要包括基于视觉感知机理的方法、基于像灰度和纹理统计特征检测方法 [79]、基于多维特征向量舰船识别方法 [80] 及基于人工智能的舰船识别与分类方法 [81] 等.

基于海洋超视距雷达的海面目标检测与跟踪. 高频地波雷达利用高频电磁波在海面绕射的原理, 实现海上舰船目标的超视距探测. 在探测过程中, 应用回波强度及 Doppler 信息可得到覆盖范围内舰船目标相对于雷达站的距离、方位和航速, 实现对特定海域内舰船的监视监测. 由于运动速度较慢, 致使舰船目标回波 Doppler 谱与海面回波 Bragg 谱不易区分; 另外, 海面回波噪声与海洋大气环境密切相关, 当风速较大时, 舰船目标回波会淹没在海面回波背景噪声之中. 这些问题为高频地波雷达海面目标探测技术带来了挑战.

目前, 国内外开展了大量的地波雷达目标探测方法研究 [82~85]. 土耳其、加拿大等国家建立了以地波雷达为主要探测手段的海上监视系统 [86]. 地波雷达目标检测方面, 典型发展有曲线拟合恒虚警率 (constant false-alarm-rate, CFAR) 检测算法 [87]、3D-CFAR 检测算法 [88]. 地波雷达目标跟踪方面, 主要是开展地波雷达舰船目标航迹跟踪比对验证实验 [89,90]. 常规用于海面目标探测的高频超视距雷达大都是大型阵列式, 雷达孔径达几百米甚至上千米, 峰值功率也较大, 为几千瓦或几十千瓦. 近几年, 国内外学者利用便携式紧凑型地波雷达开展了目标探测研究 [91,92].

3.3 海洋环境遥感遥测

海洋环境远程、大范围观测包括海表层的电磁波/光波遥感和海表以下的声波遥测. 海洋遥感利用星载或机载传感器对海洋进行远距离非接触观测, 以获取海洋景观和海洋要素的图像或数据资料, 作为一项革命性的地球环境监测技术已经获得广泛的应用. 声学遥测海底地形、地层剖面、流速剖面也已经有成熟产品, 但大范围水体性质声学测量理论与方法仍然处于研究阶段.

3.3.1 海洋环境遥感

海洋遥感是利用各种传感器通过主动发射或被动接收海面的电磁波能量实现对海洋监测的技术手段. 随着遥感技术的发展, 目前的遥感器工作的频段有紫外、可见光、红外、微波、高频、甚高频和太赫兹, 遥感器的工作方式多样化, 新型的遥感技术不断涌现. 提高观测精度与时空分辨率始终是海洋卫星的发展方向, 定量遥感是海洋卫星的发展趋势, 积极发展新型海洋遥感载荷是海洋卫星发展的重要推动力 [93].

海洋超视距雷达探测. 海态遥感是高频地波雷达系统应用的一个重要组成部分. 信号的 Doppler 频移信息可探测海面流场, 探测方法已相对成熟, 国内外商业化的高频地波雷达系统, 如岸基高频测流雷达 (coastal ocean dynamics application radar, CODAR)、高频地波 Wellen 雷达 (Wellen radar, WERA) 和海态监测分析雷达 (ocean state monitoring analysis radar, OSMAR) 系统都能提供业务化的海流监测产品 [94]. 与海流探测技术不同, 海面风场和海浪信息主要蕴含在回波二阶 Bragg 散射谱之中, 由于二阶谱信噪比低, 从而导致反演算法难以实现. 目前, 地波雷达海面风场、浪场的反演在算法上虽然已有了一定的进展, 但是距离业务化运行还有一定距离, 其鲁棒性、精确度也有待提高. 此外, 用于海洋动力环境遥感监测的高频超视距雷达大部分采用便携式的雷达系统, 雷达场地小、功率低.

海洋微波探测. 海洋微波探测是利用工作在微波频段的传感器进行海上目标 (船只、溢油、冰/冰川等)、海洋动力环境要素 (风、浪、流、温度、盐度、海面高度等) 和海洋多尺度动力过程 (潮汐、中尺度涡、锋面、内波等) 探测的科学技术. 目前以星基平台为主的微波探测已成为获取海洋信息的主

要途径之一.

合成孔径雷达、雷达高度计、微波散射计、微波辐射计是当前主流的海洋微波遥感器 [95]. 合成孔径雷达能获取高分辨率的海洋信息, 但重访周期长、幅宽不够大; 雷达高度计只能给出沿星下点的高精度的海面高度信息, 还无法做到二维; 微波散射计和辐射计虽然幅宽较大, 但分辨率低, 而且极端海况下的测量精度无法保证 [96]. 本领域未来发展趋势主要是: 进一步提升现有遥感器的海洋探测能力, 发展适用于复杂海况条件下的海洋探测理论与方法; 发展新型海洋探测手段, 拓展海洋探测对象、提高海上目标和海洋参数的探测 (反演) 精度.

海洋主被动光学探测. 海洋光学探测是利用光学技术获取海洋信息的技术手段, 涉及光学、海洋学、光电子学、遥感技术、激光技术等多个学科领域, 主要研究内容包括: 光与海水的相互作用、海洋的光学性质、光在海洋中的传输规律以及光学手段探测海洋的理论、技术与方法等.

按照是否主动发射光波, 可将海洋光学探测技术分为被动探测和主动探测两种方式. 海洋被动光学探测技术以太阳为光源, 通过被动接收海洋辐射的光谱信息, 获取海洋光学性质 (如海水透明度) 和海洋水色组分 (如浮游植物色素浓度和组成) 等信息. 当前面临的主要挑战和发展趋势包括: 以更高的空间分辨率、时间分辨率、光谱分辨率和辐射分辨率, 实现全球海洋长时间序列的卫星遥感观测, 提取全球气候变化的海洋特征参量信息; 发展适用于复杂大气 – 海洋系统的光学遥感反演理论和方法, 实现近岸浑浊水体信息的准确探测 [97]; 发展先进的光学遥感反演模型, 实现浮游植物群落结构等海洋生态系统特征参量的大范围遥感探测.

海洋主动光学探测技术通过主动发射光波来获取海洋信息, 如浅海水深、叶绿素浓度、油污分布等. 当前面临的主要挑战和发展趋势包括: 发展可提取上层海洋垂直结构信息、进行水下目标定位与识别的激光雷达海洋探测技术 [98]; 发展海洋环境参量与物质组成的水下原位 (移动) 激光探测技术, 特别是水下干涉测量、图谱合一技术等. 此外, 综合海洋光学主、被动两种探测方式的优势, 开展海洋主被动协同探测也是未来的重要发展趋势 [99].

3.3.2 海洋环境声学遥测

商业海洋声学遥测技术涵盖海底地形/地貌/地层测量、流速及水质测量、生物资源调查等, 核心技术包括信号波形设计、多波束形成与底检测、相干测深、合成孔径处理、宽带测速、多子阵快速成像、实时运动补偿等 [100], 这些技术在我国先后获得突破, 只是整体工艺水平和技术指标与国外有一定的差距. 后续研究主要以信号设计/算法改进、系统性能分析、工艺技术以及新原理、新应用模式探索为主. 另一方面, 低频、大范围声学环境遥测一直是研究人员企求的目标, 先后发展了海洋声学层析及环境成像理论与技术, 先进信息理论方法的引入有望使得这些领域取得新的突破.

海洋声学层析. 美国 Scripps 海洋研究所的 Munk 和麻省理工学院的 Wunsch 于 1979 年提出了海洋声层析的完整概念 [101], 通过分析在多对发射与接收系统之间传播的编码信号研究海洋特性, 发射 – 接收两点间声信号互易传播时间的平均值, 反映两点间海域的平均声速, 进而反映了平均温度, 两点之间声信号互易传播的时间差反映了两点连线方向海水的流速.

经过研究人员多年的努力, 声层析无论在实验设计、设备研制、反演方法和应用上都取得了长足的进步, 在世界各个海域已进行了 20 多次的大型海上实验. 最著名的应用之一是 ATOC [102]. Heard Island 实验证明经过 1 万 8 千公里的传播, 声信号仍有足够大的信噪比, 并能被压缩, 时间分辨力可达 10~50 毫秒, 可实现大范围、高准确度监测水温变化.

理论研究的进步推动着声层析的应用更富多元化, 包括将海洋声层析与海洋动力学同化实现区域动力环境 – 声场同步观测, 从固定节点层析到移动平台层析, 发展沿海声层析进行流速反演 [103].

例如, 菲律宾海声层析研究锋面、中尺度涡时空变化规律的声学监测方法, 试验中首次引入了水下滑翔器作为移动声学节点, 同时结合声层析数据和潜标等海洋动力环境测量及海洋模型作同化, 给出该海区海洋中尺度过程时空特性, 及对深海声传播的影响等 [104]. 采用现代信息理论的方法 (如压缩传感 [105]) 来指导声层析的研究, 将会是值得开展的工作.

海洋波导声学成像. 海洋波导声学技术用于海洋水下遥测已经有数十年的历史. 这项技术的基本原理是: 利用海 – 气和海 – 底两个界面之间的声音反射, 可以在海洋中形成声学波导. 早在二战期间, 海军最先应用了这一技术; 直到现在, 世界各国的海军仍然把海洋波导声学技术作为主要的水下遥测工具, 用在水面和水下舰船以及声学监视系统网络等固定装置上. 从这些观测装置的性能上看, 其水平遥测的范围都非常大, 一般比水深大许多数量级. 从 20 世纪后半叶至今, 海洋波导声学技术在海洋环境遥测中的应用范围逐渐扩大, 用于定量研究海洋和海底结构, 以及被动追踪会发声的海洋哺乳类等.

波导成像是近年来发展起来的一项很有前景的声学遥测技术, 其实验系统来源于军用目标搜索声纳, 一般采用垂直声源阵列发射一个水平全方位的简短的宽带声波, 发出的声波从海面和海底同时反射, 形成所谓波导模式的垂直驻波. 随着波导模式的传播, 它们与环境中的各种物理和生物要素相互作用, 并形成散射. 这些物质的散射回波被一个水平拖曳的线性阵列接收器连续记录下来, 并且根据回波与接收器阵列的距离和角度制图. 20 世纪 90 年代初 Makris 提出了采用水平拖曳线列阵对大面积海底成像的方法 [106]. 到 90 年代末期, 这一方法成功得到应用, 包括用于深海丘陵双重方位散射分布研究、大陆架环境远距离成像 [107], 成像处理可以实时或准实时实现.

21 世纪初, Makris 等采用该方法首次成功实现了大面积鱼群成像, 并根据成像结果及其随时间序列的变化, 研究渔业种群行为学. 这项研究的结果两次在 Science 期刊上发表, 引起了广泛关注 [108, 109], 美国国家海洋渔业署将波导声学成像技术用于每年一次的鲱鱼资源调查中. 目前系统主要安装在走航式调查船上, 将来, 随着海洋生态系统水平研究与保护管理的需要, 这项技术有可能会用于海域的长期定点观测. 值得指出的是, 上述研究给出了一个通过成像求解环境场景观测欠定逆问题的生动例子, 对后续研究有重要启示意义.

3.4 海洋信息传输

海洋信息传输必须通过非常特殊的海水介质. 海水介质的随机时 – 空变特性, 尤其是特殊的海洋环境条件 (海流、内波、海浪、潮汐、海冰、台风等), 给海洋信息传输提出了很高的技术要求. 在水下, 由于造价昂贵、维护困难, 且节点无法移动、适用对象有限, 只能在局部范围布放电缆或光缆. 要进行大范围的信息传输与组网, 需要通过无线的方式. 电磁波在水中衰减很快, 即使在相当低的频段 (如 30~300 Hz) 也只能穿透 100 m 左右的海水, 通信速率也很低 [110]. 存在波长为 450~570 nm 的蓝绿光低损耗 (比相邻频段低 3~4 个数量级) 窗口, 使得短距离 (100 m 以内) 水下高速光通信成为可能. 声波是目前唯一能在水下实现远距离无线传输的信息物理载体, 声场是水下传播最远的物理场, 成为水下组网信息传输方式的首选 [111]. 但声波频率低、工作带宽有限、传播时延大; 受海洋环境和噪声的影响, 水声信道大多呈现出多径效应, 频率色散, 而且具有强时变性, 导致严重的衰落; 水下环境条件恶劣, 操作困难, 水下设备功率也严重受限. 可以说, 水声信道是自然界中最复杂和最严酷的无线信道之一.

随着人类海洋活动的加强, 海洋技术、海洋应用、海洋科学 3 大领域均对海洋信息传输提出了重大需求. 水下互联互通技术是保障复杂智能水下系统正常运转的关键技术. 海上灾害预警、海岸警戒、

海上勘探、海上污染监测和海洋科学研究等都需要把水下数据实时或准实时地传输至水面, 然后转发至岸基或互联网. 因此海洋信息传输技术成为近年来极为活跃、发展迅速的研究领域之一.

应当指出, 海洋信息传输还包含海面信息传输, 海 – 气界面对于这一类传输有重要影响. 例如, 人们利用蒸发波导进行信息传输, 在传输速率和距离上都展现了很好的性能, 但受气候条件影响较大. 这些本文不做详细阐述.

3.4.1 水下无线光通信

水下光通信具有低功耗、小型化、高速率等优点, 对于短距离 (100 m 以内) 水下通信应用有重要价值. 水对光的影响主要是吸收损耗和散射, 由吸收和散射引起的功率损耗可表示为 $e^{-(a+b)d}$, 其中 a 和 b 分别表示吸收损耗系数和散射损耗系数, d 表示距离. 如果以 1 m 为单位距离, a 典型取值范围为 0.04~0.36, b 为 0.03~1.82 [112, 113]. 另外, 如果采用宽波束, 信号传播过程中会因波束面的扩展而降低功率, 类似于无线电波在自由空间的传播, 传播功率损耗与距离的幂级数 d^{α} 成反比 [112], 其中 α 表示路径损耗系数. 当光通信采用窄波束时, 损耗主要考虑吸收和散射; 采用宽波束时, 主要考虑路径损耗 [113].

水下光通信一般采用简单的二进制 on-off 调制或幅度调制, 大功率、高灵敏度光源及高灵敏度接收传感器是水下光通信系统的关键. 当前商用化系统可实现 100 mW 以上的功率和 100 MHz 以上开关速度. 对窄波束激光通信而言, 为使波束准确照射到接收器, 波束的定位和跟踪也是一个关键问题.

早期光通信研究主要针对天基、空基的对潜通信 [114]. 近十多年更多关注短距离的高速通信, 并通过组网拓展传输距离. 麻省理工学院、密西根州立大学、热那亚大学的研究者采用全向 LED 光源, 在 2~30 米范围内实现 Mbps 量级的高速通信 [112, 115, 116]. 如果采用窄波束激光光源, 可显著提升传输速率, 甚至到 Gbps 量级 [117]. 国内清华大学、中国海洋大学、上海光机所、桂林电子科技大学等单位也开展水下光通信研究, 中国海洋大学搭建的水下光通信系统在 60 m 距离内可实现视频传输 [118].

3.4.2 水声通信

现代意义上的水下通信始于二战的军事需求, 非相干通信多进制频移键控 (M-ary frequency-shift keying, MFSK) 调制及其派生出的各种调制方式是早期水声通信的主流技术. 20 世纪 90 年代, 为了提高水声信道的频带利用率和信息传输速率, 相移键控调制方式逐渐占据高速水声通信的主导地位.

水声信道的特征. 水声信道最显著的特征是受限的可用带宽、显著的多径扩展、快速的信道波动和突发的信道噪声. 水声信号的传输损失、噪声和混响影响传输距离、可用带宽以及接收信号信噪比, 从而决定水声信道的容量. 水声通信受限于可用带宽, 且传输距离越远, 可用频带越窄. 当前典型的商用水声通信机的带宽通常为几 kHz, 通信速率在 1 kbps 量级. 收发双方的空间位置也是影响通信链路质量的一个重要因素, 水声通信中可能存在无连通区, 即使接收端处于通信范围以内也可能没声线到达, 从而无法实现有效的通信.

水声信道的时变性来源于两个方面: 水体传输媒介自身的变化引起的信号衰落与收发器的相对运动引起的 Doppler 频移甚至 Doppler 尺度变化. 水体传输媒介自身的变化又分为季节性和每天不同时段的声速剖面变化引起的大尺度慢衰落, 以及水面波浪散射引起的小尺度快衰落. 严重的 Doppler 效应是水声信道区别于陆地无线信道的一个重要特征, Doppler 尺度的变化需要对信号进行重采样和相位补偿. 对水声信道大尺度慢衰落和小尺度快衰落的建模与估计分别采用自适应功率控制与调制和自适应信道估计与均衡等信号处理方法, 来改进系统的性能.

多径效应会造成信道的频率选择性, 影响通信信号的设计与处理. 由声信号碰到水底、水面等边界和水中的物体而发生反射, 以及由声速的变化发生折射而引起的声线弯曲 (声线总向传播速度低的方向弯折), 从而产生多径. 水平信道和浅海的多径扩展通常很显著, 其时延扩展可以有几十甚至上百个符号周期, 水声通信技术需要解决由此造成的严重的码间干扰问题; 垂直信道和深海信道的多径扩展相对较小.

水声通信的研究进展. 早期的水声通信主要采用基于能量检测的频移键控 (frequency shift keying, FSK) 非相干调制技术以克服水声信道的时变特性. 因实现简单、可靠性高、对水声信道的双重选择性有很强的适应能力, 至今跳频频移键控 (frequency-hopped frequency-shift keying, FH-FSK) 仍是多种商用水声通信机标配的调制方式 [119]. 但是, FSK 频谱利用率很低, 通常不超过 0.5 bps/Hz [120]. 20 世纪 90 年代, 随着数字信号处理 (digital signal processing, DSP) 芯片技术与数字通信理论的发展, 许多复杂信道均衡技术得以实现, 带动了水声相干通信技术的发展. 相移键控 (phase shift keying, PSK) 和正交幅度调制 (quadrature amplitude modulation, QAM) 等单载波相干通信技术能够获得更高的频谱效率, 成为主流的传输技术, 在多种应用中实现了 5 kbps 左右的速率 [121,122], 也是伍兹霍尔海洋研究所 (Woods Hole Oceanographic Institution, WHOI) 开发的通信机的主要工作模式 [123]. 但在散射环境复杂多变的浅海水平信道, 单载波相干通信易受符号间干扰的影响.

近年来, 水声通信有了长足进展, 采用了大量新技术提高传输速率、增强系统性能 [122], 包括采用多载波正交频分复用技术 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)、时反技术对抗严重的多径时延, 用多输入多输出 (multiple input multiple output, MIMO) 提高频率效率, 用 Turbo 均衡和高性能信道编码改善误码性能, 采用自适应调制解调以适应水声信道的时变特性等.

OFDM 技术在对抗信道的频率选择性方面有着天然的优势, 使用简单的频域均衡即可消除信道的码间干扰. 近十年来, 研究人员相继开展了 OFDM 水声通信技术研究及海上试验 [122,124~126]. 早在 2005 年, 麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT) 就利用零填充正交频分复用 (zero padding OFDM, ZP-OFDM) 技术在浅海 2.5 km 距离实现了最高达 30 kbps 的通信速率 [122]. Zhou 团队系统地研究了 OFDM 系统, 并研制出基于 OFDM 的商业水声通信机 [124]. 另一方面, 单载波频域均衡 (single carrier frequency domain equalization, SC-FDE) 跟 OFDM 具有相当的复杂度, 但峰均功率比更低, 可以获得更好的功率效率, 传播距离也更远, 近年来在水声通信领域也得到了关注与研究 [127,128].

通过多天线组成多发多收 MIMO 系统, 可形成多个弱相关或不相关通信链路, 从而获得更高的频谱效率, 达到更低的误码率. MIMO 技术在单载波、多载波水声通信系统中的应用成为研究热点 [129]. 在多用户环境中, 具有单根天线的移动台可以按照一定方式共享彼此的天线, 从而产生一个虚拟 MIMO 系统实现协同通信获得分集增益, 该技术在水声通信领域也逐步得到关注 [130].

时反技术作为一种自适应匹配滤波, 近十年来在水声通信中获得了广泛研究 [122]. 若令信道脉冲响应为 $h(t)$, 其对应的匹配滤波器为 $h(-t)$. 如果用 $h(-t)$ 对接收到的信号进行滤波, 可实现时域的聚焦, "时反" 也因而得名 [131]. 同时, 时反匹配滤波操作相当于在频域对信道传输函数 $H(f)$ 乘以其共轭, 故又被称为相位共轭技术 [132]. 具体执行包括主动式和被动式, 前者在发送端实现, 后者在接收端实现. 在空域进行时反处理, 可以获得空域的聚焦 [132]. 时反技术的时空聚焦特性有效抑制了符号间干扰, 提高通信可靠性. 但是, 时反通信技术需要信道响应信息, 并保证信号处理过程中信道不变. 实际应用中, 信道响应通过信道估计得到, 信道的时变性常采用判决反馈技术进行跟踪, 使本地匹配滤波器的系数随着信道变化而变化 [133]. 还发展了双扩展信道下匹配于信道散射函数的时反通信技术 [134].

无论非相干、相干, 还是 OFDM、MIMO 通信方式, 要获得满意的水声应用业务需求的误码性能,

还需要采用信道纠错编码技术. 在加性 Gauss 信道条件下, Turbo 码和低密度奇偶校验 (low density parity check, LDPC) 码是两种接近 Shannon 理论极限的纠错编码方式. 与 LDPC 码比较, Turbo 码的主要优点是编码过程比较简单、码率固定 (1/2 或 1/3)、在码长较小的情况下具有较好的性能. 将 Turbo 译码器与自适应均衡器级联, 可构成 Turbo 均衡器结构. 与 Turbo 码相比, LDPC 码的优点是码率可以任意设置、译码算法比较简单、码长较大时性能更好、可以明确纠错结果是否有误码等. 目前, 水声信道下较为常用的信道纠错编码仍是卷积码, Turbo 码与 LDPC 码的应用也已有较好的进展. 迫切需要解决如何将 Turbo 码 (或 LDPC 码) 与具体的水声调制方式相结合, 针对不同的水声信道特征, 尽量减少编码或译码时的计算复杂度, 以便在实时水声通信中应用 [124]. Turbo 均衡将信道解码和均衡级联在一起, 采用迭代解码 [135], 在时变的水声信道上获得明显的性能改进, 被越来越多的商业水声通信机采用. 不过, 虽然 Turbo 均衡非常强大, 但也很消耗处理资源 [122].

自适应调制解调包括接收端的自适应信道估计与均衡, 以及发送端的自适应功率控制与调制. 接收端成功解码主要取决于对时变信道的自适应估计与均衡. 虽然水声信道的时延扩展相当大, 但多径路径却体现出稀疏性, 即显著的多径通常只有少数几条. 该特性对信道估计性能具有重要的影响, 可以大量减少待估参数的个数. 近年来, 在判决反馈均衡、Turbo 均衡、OFDM、MIMO 等技术中对信道稀疏性进行了广泛的研究, 并取得了良好效果 [124, 136, 137]. 另一方面, 自适应功率控制可以节省能量, 自适应调制可以改进信号的检测性能 [138]. 但在水声信道中实现自适应功率控制与调制具有较大的挑战性, 水声信道的长传播时延特性, 导致接收端反馈到发送端的信道信息可能已经过时. 因此, 从时变信道中分离出慢变的信道参数以设计自适应系统非常关键.

3.4.3 水声网络

多节点互连组成网络, 可扩大数据传输距离和监测覆盖范围, 更好地实现信息共享. 伴随着商业水声 MODEM 的出现, 从 20 世纪 90 年代起, 人们开始关注水声网络的研究. 美国的自组织采样网 (Autonomous Ocean Sampling Network, AOSN) 率先提出 “水声网” 概念, 并以海网 (Seaweb) 计划进行实践与验证 [139, 140], 证实了利用声学进行水下组网的可行性, 衍生出一系列水声网计划和应用 [141, 142], 并引发了学术界对水声媒体接入控制 (media access control, MAC) 与路由等组网策略与协议的研究兴趣. 但是, 海洋环境的复杂时变、水下操作的困难以及水声节点通信能力严重受限等特点, 使水声网络要达到可靠高效的端到端传输面临很多挑战, 主要体现在以下几个方面:

(1) 节点通信能力受限: 水声信道可用带宽一般只有几 kHz 到几十 kHz, 且随着通信距离的增加而减少; 水声信道存在复杂的时、空、频变及强多途、高噪声、Doppler 效应等因素; 声波传播速度低, 这 3 个因素使得, 水声通信速率低、误码率高、中断概率大、传播时延长 (水声传播时延在几公里内可达秒级, 当数据率为 1 kbps 时, 传播时延与典型的包长度持续时间相比是不可忽略的), 而且典型的水声通信机工作在半双工状态.

(2) 网络拓扑高动态: 由于水流等环境因素影响以及搭载平台的关系, 大多数水下传感器节点存在着不同程度的移动, 海洋环境的严酷使水下节点较容易出现故障或短暂失效, 导致了网络节点不稳定的邻居关系, 水下网络拓扑具有高动态性.

(3) 网络节点能量受限: 水声节点长期工作在水下, 充电困难且费用高, 是能量资源严重受限的系统, 水声单位能量资源能传输的数据量比陆地无线通信低 3 个数量级.

另外, 水声网络大多是面向特定任务应用场景, 以满足预定需求为设计目标, 既可单独组网, 也可与水下有线网络混合组网. 预定任务的不同需求, 如节点移动性、节点布署密度、网络覆盖范围、网络生命周期、网络传输可靠性等, 将导致水声网络的不同设计.

水声 MAC 协议. MAC 协议主要解决多个用户共享信道的问题, 保证公平性和有效的资源共享. 水声 MAC 设计目标是在时变的长延迟、大中断概率及时空不确定性的水声环境下减少网络冲突, 提高网络吞吐率, 降低协议交互带来的能耗.

近十年来, 学术界对水声 MAC 协议进行了广泛研究, 在基本的陆地无线 MAC 协议上提出了一系列针对水声环境的改进算法, 文献 [143] 较全面地回顾了水声 MAC 协议. 由于海上试验的困难和昂贵, 只有少数文献给出了实际海试的评估结果 [144~146], 大多数都是理论与仿真结果.

MAC 信道访问协议可分为 3 类: 基于竞争的 (竞争型)、基于调度的 (非竞争型) 以及混合型. 非竞争型多址接入技术需要一个中心控制节点, 负责为多个用户分配信道资源, 主要包括频分多址接入 (frequency division multiple access, FDMA)、时分多址接入 (time division multiple access, TDMA)、码分多址接入 (code division multiple access, CDMA) [143]. 一般认为, FDMA 不适合用于频带资源严重受限的水声信道; Seaweb 早期使用了 FDMA, 后期采用 TDMA 和 TDMA/CDMA 混合协议 [140]. 为了提高频带利用率, 人们提出了适用于水声网络的正交频分多址 (orthogonal frequency division multiple access, OFDMA), 利用正交的子载波区分用户 [147]. TDMA 是基于时间调度的 MAC 协议, 具有能效高、受水声物理层限制少的特点, 但对网络同步要求严格. 受制于水声信道大而时变的传输延迟, 严格精确的网络同步很难实现, 使基于 TDMA 的水声网络 MAC 协议往往需要加入较长的保护时间保证时间调度的可靠性, 导致网络性能下降. 因此, TDMA 调度机制适合于小规模的水声传感器网络 [148], 如欧盟 ACMNet 采用的基于 TDMA 的主从式 MAC 协议 [142]. CDMA 利用正交的伪随机码实现信道频率、时间、空间的共享, 允许多个网络节点同时同频接入信道, 提高了信道带宽的利用率. CDMA 能有效对抗频率选择性衰落, 但其系统大多受限于多接入干扰、远近效应、功率控制算法 [149]. 因此, CDMA 往往与其他多址接入结合使用 [143].

竞争型 MAC 协议不需要为网络节点预先分配信道资源, 网络节点通过竞争动态地共享同一信道, 受水声网络物理层的限制较少, 能较好适应网络拓扑的变化. 水声网络的长时延和中断概率高造成信道利用率差, 重发概率和握手失败概率高是竞争型 MAC 协议所必须面临的挑战. ALOHA 和载波侦听多路访问 (carrier sense multiple access, CSMA) 为两种基本的竞争型接入机制. ALOHA 协议效率较低, 但与其他协议结合可以得到性能提升. 非时间同步竞争 MAC 协议实现相对简单, 但若能较好地控制时间参考点获取的代价, 基于时间同步的竞争 MAC 协议可以得到更好的性能 [150]. 巧妙地利用水声传播的长时延和时间同步, 空间位置不同的两个节点的包发送时间可以有一定的重叠, 从而提高协议效率 [151,152].

混合协议综合不同的多址方式与接入协议, 是目前水声网络 MAC 协议研究的热点之一, 如 TDMA /CDMA 结合的混合空分复用 – 时分多址接入 (Hybrid Spatial Reuse TDMA, HSR-TDMA), 时隙多址接入冲突避免 (multiple access with collision avoidance, MACA) 与免竞争型协议结合的 P-MAC, CDMA 与 ALOHA 相结合的 UW-MAC, MACA 与 CDMA 结合的长时延接入网络协议 (Protocol for Long-latency Access Networks, PLAN) 等, 具体可参见文献 [143].

水声信道的长传播时延与时变传播时延给 MAC 协议设计带来了很大的挑战. 目前, 大部分的研究都致力于克服长传播时延对 MAC 协议设计的影响, 多节点接入的公平性、服务质量保证与能耗还没受到足够的关注. 而低速率的水声信道所带来的数据传输时延也不可忽视. 特别地, 水声通信物理层用于信道估计与同步的长导码所需要的传输时间, 可能比数据传输时间还长. 已经有研究工作注意到, 长传播时延及其时空不确定性可以允许水声媒介中多个传输同时存在, 并不会造成碰撞冲突, 反而带来了 MAC 性能的提高.

水声路由与传输. 辽阔的水域和有效的传输距离, 使水下节点发送的数据需要经过多跳才能到

达水面控制中心. 多跳转发不仅可以克服通信距离受限的难点, 扩展了水声网络的规模和应用范围, 还可以增大数据转发成功率、提高网络吞吐量、降低节点通信能耗等. 路由是实现多跳转发的关键技术.

在无线自组织网络中, 多跳路由已被研究多年, 但水声网络的特点给路由转发带来了新的挑战. 首先, 水声通信的带宽较小, 路由控制消息占用了部分带宽, 留给数据传输的带宽已不多. 其次, 节点的移动性带来网络拓扑的时变性, 引发了路由变化, 需要定期触发路由更新和路由维护. 第三, 水声链路不稳定、丢包率高等特点, 使得路由建立与数据包的转发效率均不高, 可能需要反复重传. 上述第二、三点使路由维护是高能耗的, 但水声节点的能量非常受限, 因此能效是水声路由设计必须考虑的问题, 也是一个严峻的挑战.

根据水声网络特点, 基于陆地无线路由协议的改进, 研究提出了多种适用于水声网络特点的路由协议, 期望在降低协议能耗和端到端延迟的同时, 不断提高传递效率和可靠性, 具体可参见文献 [153].

在动态水声网络中, 节点部署稀疏且移动频繁、网络拓扑动态变化、延迟高、不存在端到端的持续连通, 具有容迟容断网络的特点, 机会路由可能是一种较好的选择 [154]. 机会路由是应对高丢包率链路的有效方法, 利用多个弱链路成功接收数据包的小概率 (即 “机会”), 将多个弱链路组合成一个虚拟的强链路, 实现多节点的分布式接收分集, 提高数据包接收成功率. 存在的问题是数据包副本太多, 造成了带宽与能量浪费. 为了控制数据副本数, 机会路由可以先选择部分节点为转发集节点, 通过转发集节点的互相协调, 利用节点位置坐标、距离、基于距离的节点分层、深度等信息, 只允许最有利于端到端路由性能的节点转发数据, 降低副本数, 关于机会路由的研究进展可见文献 [154]. 利用自主水下航行器 (autonomous underwater vehicle, AUV) 中继, 辅助数据转发, 也是一种提高水下网络的数据收集能力的有效方法 [155]. 链路连接的不稳定性与 AUV 的移动性, 使 AUV 节点可以采用延迟容忍网络的缓存 – 携带 – 转发策略.

水下网络路由研究刚起步. 从研究现状看, 仍缺乏适应于大规模动态的水声网络路由协议. 如何结合具体水声网络应用场景, 将水声网络一些所谓的 “不利因素” 转变为有利因素, 设计更加高效的路由方法仍是未来目标. 如节点的移动性可能会给当前的路由方法带来额外的路由开销, 甚至降低其端到端的性能, 但 AUV 的移动性以及缓存 – 携带 – 转发策略, 反而有助于提高数据转发率. 水声网络基于深度的立体分层特性与数据传输的非对称性, 也可以有效改进机会路由的性能. 结合网络编码、数据压缩等技术也是未来路由研究的一个重要方向.

3.5 海洋信息融合

信息融合, 也被称作为数据融合或多传感器融合, 指的是利用多种手段获取不同层次、不同特征的信息, 并通过多层次、多方面、多级别的信息处理, 包括检测、跟踪、关联、估计、识别、解译、决策等, 以得到高级别、更易于理解、更加全面、更为精确有效的信息, 实现去粗取精、去伪存真、由低到高、由部分到全面的认知上的升华过程 [156]. 1988 年, 美国国防部把信息融合列为重点研究开发的 20 项关键技术之一, 且列为最优先发展的 A 类. 随后, 信息融合进入了快速发展阶段, 在理论与方法上不断出现新的突破, 同时也从军用走入民用的各个领域. 1998 年国际信息融合学会成立, 每年举办一次信息融合学术年会, 2009 年, 中国航空学会信息融合分会成立, 是目前国内唯一以信息融合命名的学术团体. 信息融合现已广泛应用于与信息相关的各类行业, 如工业过程监视、交通管制、机器人控制、智能驾驶、安全防护、医疗、金融等 [157~159].

如第 1 节所述, 信息融合理论起源于水下信号处理. 1973 年美国军方利用多个独立连续的声纳信号对敌方潜艇进行探测 [160], 发现其性能远优于利用单个声纳对潜艇的探测. 这一尝试被认为对现代

战争具有非常重要的意义. 此后, 海洋一直是信息融合最为重要和关注的研究对象 [161~163]. 在军用领域, 海洋信息融合是海上军事信息系统最为核心的关键支撑技术, 其中较为典型的有美国海军 90 年代的协同作战能力 (cooperative engagement capability, CEC) 系统、21 世纪提出的海上力量设想等; 在民用领域, 海洋安全监管、海上突发事件应急响应、海上搜索救援 [164]、海洋环境监测保护 [165]、海洋资源勘探开发、海洋防灾减灾等方面对海洋信息融合的需求与日俱增. 在国内, 国家自然科学基金委员会将水声传感器网络的信息融合技术列为重点研究方向.

海洋信息的获取手段多样, 例如星载 SAR、高频地波雷达 (high-frequency surface wave radar, HFSWR) 和舰船自动识别系统 (automatic identification system, AIS) 等, 且具有各自的优势和不足. 星载 SAR 可探测卫星过境时刻舰船目标的位置和类型, 但不能连续观测; 高频地波雷达可实现对移动船只目标的连续探测, 但其空间分辨率较低, 定位精度较差; AIS 能提供监视区域内的合作目标的动态和身份信息, 但不能提供非合作目标的信息, 特别是外国军用舰船目标的信息. 通过融合星载 SAR、地波雷达和 AIS 3 种手段的检测结果, 可以识别出海上非合作目标, 提高对海上船只目标的探测和监控能力. 除高频地波雷达、SAR 和 AIS 外, 包括机载传感器、临近空间平台传感器和水下传感器网在内的多平台多传感器融合探测引起了人们的关注, 出现了一些新的舰船目标融合探测方法 [166, 167].

受台风、洋流等因素影响, 海洋环境复杂, 气象多变, 对声、光、电、磁等探测手段具有不确定的影响. 海洋观测数据蕴含着各种海洋环境/过程的未知机理以及不同海洋环境/过程之间相互作用的复杂关系, 呈现海量性、开放性和复杂性等特征; 另一方面, 现有的海洋观测中不同传感器的工作环境与观测对象存在差异 [168, 169], 所获取的海洋数据的时空分布与分辨率也不尽统一, 这使得现有的分析处理方法难以适用. 同时, 海洋观测技术正朝着实时、长期、连续、大范围、多尺度、高分辨、精细化、立体化、网络化的方向发展 [170, 171], 对获取的海洋组网观测数据的分析迫切需要智能、快速信息融合理论与方法的支撑.

4 关键科学问题

4.1 海洋探测的物理机制及其与环境的耦合

海洋信息传播、获取的载体包括声、光、磁等, 它们在水体中的发生、传播、变化、感知与水域物理特性有很紧密的联系. 这些物理特性包括水面、水体、水底不同时空尺度的物理过程以及与陆、气、冰、地壳界面的交互作用. 例如声波作为水下信息远程携带的主要载体, 在海洋探测与数据传输中扮演着至关重要的角色, 其远程传播经常受到涡旋、内波、锋面等海洋动力过程的影响, 因此声场信号中也包含了海洋动力过程信息. 开展探测的物理机制及其环境耦合效应研究, 可以了解现有技术手段在海洋探测、通信中的限制条件, 进而发展突破这些限制条件的信息处理新理论和新方法.

水声信号处理领域早先发展了结合声场传播建模的匹配场信号处理方法, 并多次在低频被动声源定位、海洋环境反演等大型试验中应用. 这些研究方向近年来都从环境静态建模转向动态建模, 力图捕捉声场传播与水域动力过程的动态耦合, 有研究将大范围、低精度的模式预报和小范围、高精度的声场 – 动力采样相结合, 实现区域动力环境 – 声场同步、机动、智能监测. 海洋遥感采用不同类型的物理机制获取水表层物理信息, 也可望通过与动力过程的耦合扩展到水下.

因此, 海洋信息获取需研究海洋物理过程对声、光、磁等在水体中发生、传播、变化、感知的影响, 通过对海洋物理过程和状态进行物理学表征及与声、光、磁场的耦合建模, 揭示声场、光场、磁场在水域时空上的演化规律; 在此基础上, 发展基于模型的信号和信息处理、水域感知理论与方法.

若干重要研究方向包括: 水域时空过程声、光、磁作用新机理及传感新方法; 水域声、光、磁场时空演化模型及相适应的信号信息处理理论与方法; 声场 – 动力耦合三维建模、数据同化及快速并行计算; 海洋遥感三维时空扩展的理论与方法.

4.2 多基地水下弱目标探测

随着水下目标声隐身与消声瓦技术的发展, 水下目标辐射噪声逐年降低, 声波反射目标强度也大幅降低, 导致被动与主动声探测系统对水下目标的发现概率和探测距离逐步降低. 为了提高水下弱目标的发现概率与探测距离, 需要从目标特性、水声信号传播规律、水声数据获取与阵列处理、水声信号检测与参数估计等多方面开展创新研究, 尤其需要在水下探测体制方面取得突破.

近年来, 随着能源、推进器、导航、控制以及传感器技术的提高, 无人水下航行器发展迅速, 多水下航行器节点的协同探测成为重要的研究方向. 与过去静态多基地探测相比较, 多个水下移动节点的水声协同探测会产生明显的变化, 主要体现在水下联合探测体制上, 将空时自适应处理技术与多基地 MIMO 相结合是可能的解决方案 [172]. 一方面, 可以实现对多目标定位, 避免了目标距离估计, 降低了系统对信号带宽以及发射机和接收机时间同步的要求. 另一方面, 混响谱具有两维空间特性, 呈现出发射空间 – 接收空间 – Doppler 三维混响谱结构 [173]. 利用这一特性, 采用空时自适应处理方法, 使混响抑制变得简单灵活.

然而, 该技术本身存在几个亟待解决的问题. 首先, 它继承了多基地收发分离带来的距离非平稳特性, 其混响仍然存在距离依赖性; 其次, MIMO 技术带来的虚拟通道数、自由度倍增在提高声纳系统性能的同时, 也导致了运算量和需求的样本数倍增; 第三, 目前的研究大多以发射站、接收站静止为假设前提, 需进一步考虑发射站、接收站、以及目标的运动状态对探测和估计性能的影响. 此外, 支撑移动网络的协同通信、导航、定位、控制等方法与技术也是需要解决的问题.

4.3 海上目标识别和分类稳定性与适用性

目前, 随着高分辨率极化 SAR 技术的发展, 基于高分辨率 SAR 数据的船只探测、识别和分类技术已成为海洋遥感领域的研究热点. 然而, 对于高分辨 SAR 数据而言, 基于 Gauss 假设的海面背景噪声统计模型不再成立 [174], 这必然对传统船只 (尤其是小型船只) 的 CFAR 探测技术带来困难.

同时, 在船只目标参数特征提取方面, 由于船只目标散射场的极化特征和强度特性随雷达入射角、方位角以及船只姿态的敏感性导致目标特征提取、选择与描述复杂化, 这为获取稳定、有效的检测特征带来了挑战, 从而影响目标识别和分类的准确性 [71].

在数据库实现方面, 可供实验验证的船只样本数据过少也是限制 SAR 图像船只识别和分类技术发展的一个重要问题. 现阶段, 结合计算电磁学的计算机仿真技术可分析船只散射信号与雷达波长、入射角、极化方式以及舰船几何外形和姿态等关键因素的关系, 是克服船只散射样本数据过少的一种可供选择的技术手段 [62,175,176]. 然而, 鉴于船只目标具有大尺寸而且结构复杂的特征, 基于计算电磁学的仿真方法也面临计算量大、耗时长的挑战.

4.4 复杂海洋环境新体制遥感探测

海洋遥感研究利用海洋物理过程对电磁波在水体中发生、传播、变化的影响及其演化规律, 发展海洋信息遥感探测模型与方法. 通过近 30 年的研究, 海洋遥感理论与方法已取得不少成果, 对于一般海况条件下, 单一遥感手段的遥感探测机理已取得一定共识, 建立了一些理论模型. 目前亟需研究复

杂与极端海洋环境下电磁波与水面、水体的相互作用机理, 发展并建立新体制遥感器海洋探测的相关理论.

在复杂海况条件下, 海洋微波遥感无论是应用于海上目标探测还是动力参数反演都存在问题. 因此需要提升现有遥感器的海洋探测能力, 发展适用于复杂海况条件下的海洋探测方法及其性能分析, 在遥感平台与技术创新的基础上, 发展采用稳定可靠的多星组网方式进行协同观测的方法.

海洋光学遥感需要开展复杂大气 – 海洋系统光学遥感信息提取的新理论和新方法研究, 研究主被动光学协同探测机理与方法, 水下光学成像与光谱原位探测的机理与关键技术等.

海洋超视距雷达需要发展新体制 (MIMO、分布式、无源等) 超视距雷达海洋探测理论和方法, 研究海洋超视距雷达组网观测与信息融合理论与方法, 以提高雷达作用距离、定位精度和复杂环境下的目标探测性能, 同时研究海洋超视距雷达高精度风、浪场探测理论与方法.

4.5 水下通信与跨界信息传输

21 世纪是 "海洋世纪", 水域通信网络必将水下通信网络、水上通信网络、空间信息网络和陆地通信网络构成一体化网络, 以提供全海区无缝覆盖、灵活及时、经济便利、安全可靠、高速率、多媒体化的海洋信息服务. 单一的通信手段已无法满足这些需求, 研究海洋互联网的新的网络架构, 将移动自组织网、蜂窝通信网、卫星通信网等各类网络融合, 将是水域无线通信与网络技术可能的发展趋势. 然而海洋互联网的构建必须先解决水下声学通信和水下 – 空域信息传输这两大难题. 这里我们试图列举若干重要的研究方向.

(1) 自适应调制. 由于水声信道带宽极其有限并且具有天然的时变特征, 自适应调制是提高水声信道频谱效率, 充分挖掘频谱资源的有效途径. 自适应调制指点对点通信系统中发送端根据接收端反馈的信道信息, 调整发送端信号处理参数, 以优化系统整体性能的过程. 一般发送端可调整的参数包括编码速率、调制阶数、功率等. 常见的系统性能指标主要有: 1) 功率受限下最大化吞吐量; 2) 满足吞吐量要求的前提下最小化发射功率. 自适应调制在陆地无线电系统已有较广泛的研究, 但由于水声信道的特殊性, 这些研究成果并不能直接用于水声信道, 难点主要体现在以下两个方面: 1) 水声信道带宽窄, 接收端难以将完整的信道信息反馈给发送端; 2) 水声信号传播速度慢, 造成反馈信息显著的时延, 一般可达到秒级的反馈时延. 基于以上因素, 自适应水声通信需要专门针对水声信道特性展开研究, 包括信道性能衡量指标及其短时/长时预测模型, 面向水声通信的自适应调制数学建模, 低复杂度调制参数自适应调整算法, 以及双工通信技术等.

(2) 水声信道建模与识别. 水声通信研究一直以来将克服信道传播时延 —— Doppler 双扩展效应作为重点之一, 隐式/显式地将信道模型嵌入信号处理中. 对水声信道的早期研究主要集中在大尺度上的传播方式以及平均能量损失方面, 即主要探讨在何种情况下声信号在海洋中能传得更远. 水声通信, 尤其高速水声通信, 更关注声传播在小尺度上的效应, 特别是其时变特性与随机特性. 在小尺度上, 水声信道通常表现出稀疏多径特性, 各条路径经历的衰落时变规律并不相同, 各条路径上的 Doppler 尺度和 Doppler 扩展也不尽相同. 这样的特性, 常常采用时变多尺度多径模型 (multi-scale multi-lag, MSML) 来描述, 但并不一定满足通常的广义平稳不相关散射条件 (wide-sense stationary uncorrelated scattering, WSSUS). 虽然已经有不少研究采用海试数据来拟合模型并进一步构建仿真器, 但对于水声信道模型还有如下一些关键问题有待研究: 统计特性, 包括时域相关特性、散射相关性等; 多尺度的识别与补偿; 幅度参数时变建模与估计; 通用或标准的信道模型或数据库.

(3) 强约束条件下的网络资源动态调度. 海洋环境的恶劣使得水下难以存在长期稳定运行的骨干网, 更多的是面向任务需求的自组织网络, 网络设计以满足预定需求为目标. 水声信道可用带宽窄、水

下充电困难, 能量资源严重受限. 另一方面, 水声网络是强时变的高动态网络, 表现为两个方面: 一是水下链路通信可靠性低、中断概率大、具有强时变性; 二是水下静态节点位置的漂移和机动节点的运动性, 使得水声网络拓扑具有高动态性. 如何在这样一个强约束条件下, 适应时变的信道和高动态的拓扑以达到高效的资源调度, 提高信道利用率和网络容量是人们必须面临的挑战. 根据开放系统互联模型, 人们可以从不同层面来考虑网络资源调度问题. 媒质接入层解决多个用户共享信道问题, 拓扑控制与路由实现多跳转发, 两者本质上是在随机用户需求状态下, 如何适应时变的信道条件和网络环境, 更高效地实现信道调度和路由选择. AUV 的大量使用虽然带来了网络拓扑的高动态性, 但 AUV 的自主可控性却是可以带来额外的好处, 如人们可利用 AUV 辅助拓扑控制和中继, 提高网络容量. 目前人们已陆续提出多种水声 MAC 协议和路由策略, 但仍缺乏系统性的分析和试验验证, 还有如下一些关键问题有待研究: 面向时变动态水声网络的跨层设计; AUV 辅助的高效拓扑控制与机会路由; 动态节点可定义的水声网络模型与容量分析.

(4) 跨界通信. 海水赋予水下航行器无与伦比的隐蔽性和机动性, 但作为良导体, 海水也同时屏蔽了几乎所有的电磁波和光, 给空中与海水的跨界信息传输带来巨大的困难. 目前, 跨界信息传输大致分为两类: 一是借助于电磁波和蓝绿激光, 穿透海水的直接传输; 另一类是借助于浮标的中继传输. 极低频 (extremely low frequency, ELF, 3~300 Hz) 电磁波信号可以穿透海水到几百米的深度, 美国从 1958 年起借助于若干 ELF 项目, 前苏联通过 ZEVS 项目, 对 ELF 对潜通信进行研究, 但传输率低、发射天线巨大, 只能进行从空中到水下的单向通信. 蓝绿激光是一种波长为 450~570 nm 的可见光, 与海水的吸收光谱基本错开, 因此, 在海水中的吸收损耗极小, 可以穿透很深的海水; 而且理论带宽相当惊人, 可以实现高速宽带信息传输. 但蓝绿激光通信系统需要大量卫星和庞大的地面支援设施, 且蓝绿激光极强的指向性要求必须知道水下航行器的大致位置, 水下通信的覆盖范围非常有限. 采用光纤或者声 – 射频转发通过浮标中转可以实现双向、实时的通信, 但布放维护不便, 覆盖范围有限.

目前, 借助于电磁波的跨界通信的研究重点已从 ELF 转向更高频段甚低频 (very low frequency, VLF), VLF 在跨界及水下信道的传播机理和传播特性是需要解决的科学问题. 例如 VLF 在海面 – 海水以及海水 – 海面信道中激发的电磁场及其在时、频、空的传播特性; 水下电磁波的传播速度随频率变化的性质及其对高速通信信号的影响; VLF 频段环境噪声的分布与预报等. 在借助于浮标的跨界通信中, 声信号的跨层传播问题也是需要解决的科学问题. 通过上述问题的研究, 建立 VLF 电磁波传播参数的预报模型, 为 VLF 跨界信息传输的实现提供理论基础. 在实现跨界通信的技术方面, 可能的研究方向包括高效的发射与接收天线设计与实现、大功率合成与天线匹配技术、水下发射与接收电磁阵的设计与实现、极微弱跨界信息传输条件下的通信体制与信号处理等. 此外, 基于海面光 – 声转换的空 – 海通信也是值得关注的研究方向, 但要取得突破, 需深入研究、掌握转换的物理机理, 提出与其相适应的通信应用模式和方法.

4.6 广域水下成像与情景分析

海洋现象观测和水下目标探测的关键问题是信息深藏在信号之中, 水下场景中存在比感兴趣的目标要大 3 个数量级以上的类目标干扰信号, 例如远处的航船、各种海洋动力学现象、各种自然灾害过程等; 这些类干扰信号的辐射或散射声源级通常也比感兴趣的目标大 3 个数量级以上. 然而我们能够用来观察水下目标和海洋现象的节点传感器数目在空间和时间上的分布却是有限的、离散的、动态的、不确实的, 因此观测过程复杂时空多变的海洋环境, 探测在其中运动或静止的目标, 是一个非常有挑战性的问题.

上述问题可以构建为欠定条件下逆问题求解, 其有效的求解方法为成像, 由空间分布和时间连续

的观察数据, 引入随机多路径声场的高维度与丰富性, 对欠定问题进行 “补欠”; 引入知识性的不变特征或约束以及合理的数据变换 “降维”, 由部分信息通过拼接、合成、演化等递归地实现水下成像与情景分析. 这里的 “像” 区别于传统声纳或者光学图像, 是一种广义的 “像”, 即原位传感、水面遥感、声学遥测于一体的场景 “像”.

目前该方向的研究在国际上也处于起步阶段. 美国麻省理工学院针对大范围鱼群探测发展了声学成像技术 [108, 109]. 该项研究首次通过试验论证了分布式大范围声学成像的可行性, 给鱼类行为学研究提供了前所未有的手段, 然而系统的水下情景成像理论尚待建立.

若干重要研究方向包括: 水下随机多路径声场的高维度和丰富性表征; 水下成像复杂主动信号设计及信号处理方法; 水下成像与情景分析信息理论与方法; 水下成像与情景分析的快阵处理算法; 分布式网络水下成像与情景分析方法等. 例如在目标探测问题中, 可利用目标信号与干扰物理特性表现出的不同数学结构特性, 即目标信号往往表现为稀疏结构特性, 干扰往往表现为低秩结构特性, 而噪声作为剩余误差则一般表现为满秩特性, 构建低秩与稀疏联合模型, 采用稀疏传感或可再生核 Hilbert 空间方法, 对 “目标像” 和 “干扰像” 予以分离.

4.7 海洋智能数据处理与大数据

海洋环境包括动力环境和生态环境, 具有空间范围大、三维立体和多尺度动态变化的特性, 现有观测手段的能力和局限性不尽相同. 遥感和高频超视距雷达具有大范围观测的优势, 但一般只能获取海表的信息; Argo 浮标、潜标能获取精确的海洋现场剖面信息, 但需大量布放; 数值模拟可得到海洋的三维结构信息, 但模拟精度有待提高且需充分的观测数据支持; 声层析可同步获得海洋大范围的三维温度场和流场, 但反演结果因集合效应是空间平均值, 反演精度与距离、频率有关. 因此单一观测手段或网络不能满足海域整体认知的需求.

海洋数据智能处理即在海量、多源、多尺度、多手段立体观测数据背景下, 面向海洋目标和环境/过程, 在多源异构数据融合、数据挖掘分析、数值模拟、快速计算和可视化等一系列数据智能处理领域的理论和方法方面开展研究, 以达到对海洋环境/过程认知的目的. 前沿的研究方向应涵盖 3 个方面: 第一, 海洋信息提取与计算新方法, 具体包括海域声、光、电探测信号级信息提取及分析方法, 基于长时间序列的海洋中大尺度过程特征提取方法, 基于数据挖掘的复杂海洋过程未知机理发现和复杂海洋过程数值模拟快速计算方法; 第二, 海洋多尺度过程数据处理与表达方法, 具体包括时空分布不均匀和分辨率不统一的海洋数据融合方法, 支持数据同化的海洋多尺度信息分离方法和海洋动态多尺度过程的虚拟现实与可视化表达; 第三, 海洋观测平台在线智能数据获取与处理方法.

从 20 世纪 90 年代, 各国开始大量发射遥感卫星, 截止到 2014 年底, 在轨卫星数量为 315 颗, 涉及超过 30 个空间机构 [177]. 预期后续还将有更多的卫星发射. 以美国国家海洋大气管理署为例, 在 2012 年, 每年收集的数据总量超过 30 PB, 每天收集的数据文件超过 3.5 亿个. 目前, 除了遥感观测手段外, 还有浮标、船测等传统方式, 各个国家也争相发起观测计划, 比如 Argo, NEPTUNE-Canada, GOOS, OOI, IOOS 等, 因此, 海洋观测数据从昔日的稀少正在逐渐演变成数据爆炸, 海洋数据即将进入大数据时代.

海洋大数据中蕴藏着巨大的价值, 大数据方法研究将成为海洋信息技术研究的下一个热点. 例如 Durack 等通过对 Argo 数据的挖掘发现了一个逐渐增强的全球水循环 [178]. Brown 等利用遥感数据提取得到海洋生物的分布, 用以维护海洋生态平衡 [179]. 因此, 合理发掘海洋大数据, 可以有效地为社会经济发展及气候预测提供决策支撑, 同时进行灾难预警服务.

5 结语

2013 年 6 月国家自然科学基金委主办了主题为 “面向海洋感知与导航应用的水声网络基础研究” 的第 96 期 “双清论坛” 研讨会, 认为开展面向海洋感知与导航应用的水声网络基础研究在国民经济与国家安全方面具有重大的国家战略需求. 2014 年、2015 年国家自然科学基金项目指南中, “面向移动节点的水声传感器网络基础研究”、“分布式水声网络定位与探测基础研究” 分别被列为信息科学部优先资助重点领域. 连续两年建立关于海洋水下信息获取、通信、组网、探测、导航等多领域的重点基金群, 为我国海洋信息基础理论与技术研究的协同创新提供了难得的机会. 本文正是这一重点基金群学者们共同努力的结果. 海洋信息获取、传输、处理及融合涵盖了非常广的领域, 提出或者发展的信号处理方法大多是面向应用的, 没有一种良方适用于所有应用. 由于海洋信息的获取主要依赖声波、电磁波, 它们与海洋介质的相互作用在信号处理与通信中扮演了关键的角色, 忽略这种作用的处理通常效果平平. 如何充分发掘独特的海洋信道特性来提高性能是近年来海洋信号与信息处理研究的焦点. 然而这类研究需要寻找源头的信息理论, 才能更具创新的活力.

通过对于研究现状的回顾和科学问题的凝练, 总结出关于海洋信息研究的以下观点:

(1) 根据系统需求和海上数据, 找出关键问题;

(2) 提出的解决方案必须考虑实际数据可能遇到的因素;

(3) 处理性能的评估需基于海上现场数据, 湖上可以测试技术功能, 但不能评估真实的系统性能;

(4) 由静态节点和移动节点共同组成的分布式观测/探测系统是目前水下传感的发展趋势;

(5) 大量协作、智能的 AUV/Gliders 群在战场/海洋空间应用中具有无可比拟的优势;

(6) 与其他研究领域的集成对于收集合适的数据改进信号处理至关重要;

(7) 应当加强面向系统或者目标的应用/演示;

(8) 建设专用的公共海上试验平台和数据共享平台.

特别地, 我们认为应当及早开展水下遥感体系的基础理论、方法和技术研究, 充分发掘声波、电磁波与水下介质的相互作用机理, 采用现代信息理论进行设计, 力图在水下建立类似于卫星遥感这样的技术和能力体系, 为实现透明海洋、智慧海洋提供创新的技术手段.

致谢 文撰写过程中得到宫先仪、杨子江、何友、孟俊敏、李建龙、官权升、陈芳炯、刘云、丁跃华、王海燕、申晓红、姜喆、闫永胜、王运华、钱程程、葛凤翔、马永涛、范双双等学者的帮助, 尤其宫先仪院士在理论框架上给予重要指导, 基金委信息学部、信息一处对本项工作给予了大力支持, 在此向他们一并表示感谢!

参考文献

1 Zhang R H. The development trend of underwater acoustic technology is osculatory combination of underwater acoustic physics, signal processing and ocean environment. Appl Acoust, 2006, 25: 325–327 [张仁和. 水声物理、信号处理与海洋环境紧密结合是水声技术发展的趋势. 应用声学, 2006, 25: 325–327]

2 Scharf L L. Statistical Signal Processing: Detection, Estimation, and Time Series Analysis. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1991

3 Kay S. Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume I: Estimation Theory. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1991

4 Poor H V, Thomas J B. Advances in Statistical Signal Processing. Stamford: JAI Press Inc, 1993

5 Scharf L L. On Unbiasedness and Invariance in Signal Detection Theory. Dissertation for Ph.D. Degree. Washington D C: University of Washington, 1969

6 Shannon C E. A mathematical theory of communication. Bell Sys Tech J, 1948, 27: 379–423
7 Jaynes E T. Information theory and statistical mechanics. Phys Rev, 1957, 106: 620–630
8 Verdu S. Guest editorial. IEEE Trans Inf Theory, 1998, 44: 2042–2044
9 Verdu S. Fifty years of Shannon theory. IEEE Trans Inf Theory, 1998, 44: 2057–2078
10 Wiener N. Selected Papers of Norbert Wiener. Cambridge: MIT Press & SIAM, 1964
11 Kalman R E, Bucy R S. New results in linear filtering and prediction theory. J Basic Eng, 1961, 83: 95–108
12 Candy J V. Bayesian Signal Processing: Classical, Modern, and Particle Filtering Methods. Wiley Inter Science, 2009
13 Fisher R A. Theory of statistical estimation. Proc Cambridge Phil Soc, 1925, 22: 700–725
14 Kailath T, Poor H V. Detection of stochastic processes. IEEE Trans Inf Theory, 1998, 44: 2230–2259
15 Helmberg G. Introduction to Spectral Theory in Hilbert Space. New York: Dover Publications, 2008
16 Synowiec J A. Introduction to Hilbert spaces with applications. SIAM Rev, 1993, 35: 341–342
17 Colton D, Kress R. Inverse acoustic and electromagnetic scattering theory. Appl Math Sci, 1998, 93: 67–110
18 Kailath T. RKHS approach to detection and estimation problems I: deterministic signals in Gaussian noise. IEEE Trans Inf Theory, 1971, 17: 530–549
19 O'Sullivan J A, Blahut R E, Snyder D L. Information-theoretic image formation. IEEE Trans Inf Theory, 1998, 44: 2049–2123
20 Chen S, Lan Y. Broadband flextensional transducer with major axis lengthened. Acta Acustica, 2011, 36: 638–644 [陈思, 蓝宇. 长轴加长型宽带弯张换能器. 声学学报, 2011, 36: 638–644]
21 Li Q H. New advances of underwater acoustic signal processing. Appl Acoust, 2012, 31: 1–9 [李启虎. 水声信号处理领域新进展. 应用声学, 2012, 31: 1–9]
22 Burenkov S V, Gavrilov A N, Uporin A Y, et al. Heard Island feasibility test: long-range sound transmission from Heard Island to Krylov underwater mountain. J Acoust Soc Am, 1994, 96: 2458–2463
23 Worcester P F, Spindel R C. North pacific acoustic laboratory. J Acoust Soc Am, 2005, 117: 1449–1510
24 Li S, Schuliheiss P M. Depth measurement of remote sources using multipath propagation. IEEE J Ocean Eng, 1993, 18: 379–387
25 Del Balzo D R, Feuillade C, Rowe M M. Effects of water-depth mismatch on matched-field localization in shallow water. J Acoust Soc Am, 1988, 83: 2180–2185
26 Feillade C, Del Balzo D R, Rowe M M. Environmental mismatch in shallow-water matched field processing: geoacoustic parameter variability. J Acoust Soc Am, 1989, 85: 2354–2364
27 An L, Wang Z, Lu J. Calculating the waveguide invariant by the 2-D Fourier transform ridges of Lofargram image. J Chin Electron Inf, 2008, 30: 2930–2933
28 Li Q. Theoretical analysis and experimental results of interference striation of underwater target noise in shallow water waveguide. Chin J Acoust, 2011, 31: 73–80
29 Nehorai A, Padeli E. Acoustic vector-sensor array processing. IEEE Trans Signal Process, 1994, 42: 2481–2491
30 Lemon S G. Towed array history, 1917–2003. IEEE J Ocean Eng, 2004, 29: 365–373
31 Ricker D W. Estimation of coherent detection performance for spread scattering in reverberation noise mixtures. J Acoust Soc Am, 2000, 107: 1978–1986
32 Hlawatsch F. Time-frequency formulation, design, and implementation of time-varying optimal filters for signal estimation. IEEE Trans Signal Process, 2000, 48: 417–432
33 Pan X, Li C, Xu Y, et al. Combination of time-reversal focusing and nulling for detection of small targets in strong reverberation environments. IET Radar Sonar Nav, 2014, 8: 9–16
34 Bhattacharya T K. Neural network-based radar detection for an ocean environment. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1997, 33: 408–420
35 Buzzi S, Lops M, Venturino L. Track-before-detect procedures for early detection of moving target from airborne radars. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2005, 41: 937–954
36 Hayes M P, Gough P T. Synthetic aperture sonar: a review of current status. IEEE J Ocean Eng, 2009, 34: 207–224
37 Lee J, Burke M, Hammond J. The theoretical prediction, interpretation and computation of the Fourier-Mellin transform applied to sonar classification of ships. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE Signal Processing Society, Albuquerque, 1990. 2735–2738

38 Goldberg D E. Genetic algorithms and Walsh functions: part I, a gentle introduction. Complex Syst, 1989, 3: 129–152
39 Alan I C, Atkins P R, Foo K Y, et al. Phase calibration of sonar systems using standard targets and dual-frequency transmission pulses. J Acoust Soc Am, 2011, 130: 1880–1887
40 Li Q H, Li M, Yang X T. The detection of single frequency component of underwater radiated noise of target: theoretical analysis. Acta Acustica, 2008, 33: 193–196 [李启虎, 李敏, 杨秀庭. 水下目标辐射噪声中单频信号分量的检测: 理论分析. 声学学报, 2008, 33: 193–196]
41 Liu G M, Sun C, Yang Y X. Feature extraction of passive sonar target based on two cepstrums. J Northwestern Polytech Univ, 2008, 26: 276–281 [柳革命, 孙超, 杨益新. 两种倒谱特征提取技术在水声目标识别中的应用. 西北工业大学学报, 2008, 26: 276–281]
42 Wu G Q, Chen Y Q, Li L Q, et al. The analysis of underwater transient signal and their detection by spectral correlation. Acta Acustica, 2000, 25: 510–515 [吴国清, 陈永强, 李乐强, 等. 水声瞬态信号短时谱形态及谱相关法检测. 声学学报, 2000, 25: 510–515]
43 Zhang X Y, Luo L Y. Recent development of passive sonar signal detection. Tech Acoust, 2014, 33: 559–563 [张晓勇, 罗来源. 被动声纳信号检测技术发展. 声学技术, 2014, 33: 559–563]
44 Yan S F, Ma Y L. Sensor Array Beampattern Optimization: Theory with Applications. Beijing: Science Press, 2009 [鄢社锋, 马远良. 传感器阵列波束优化设计及应用. 北京: 科学出版社, 2009]
45 Yan S F, Ma X C. Designs and implementations of broadband beamformers. Acta Acustica, 2008, 33: 316–326 [鄢社锋, 马晓川. 宽带波束形成器的设计与实现. 声学学报, 2008, 33: 316–326]
46 Mio K, Chocheyras Y, Doisy Y. Space time adaptive processing for low frequency sonar. In: Proceedings of OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition, Providence, 2000. 1315–1319
47 Candy J V. Signal Processing: the Model Based Approach. New York: McGraw-Hill, 1986
48 Fizell R G. Application of high-resolution processing to range and depth estimation using ambiguity function methods. J Acoust Soc Am, 1987, 82: 606–613
49 Livingston E, Diachok O. Estimation of average under-ice reflection amplitudes and phases using matched-field processing. J Acoust Soc Am, 1989, 86: 1909–1919
50 Hamson R M, Heitmeyer R M. Environmental and system effects on source localization in shallow water by the matched-field processing of a vertical array. J Acoust Soc Am, 1989, 86: 1950–1959
51 Fueillade C, Kinney W A, Del Balzo D R. Shallow-water matched field localization off Panama City, Florida. J Acoust Soc Am, 1990, 88: 423–433
52 Richardson A M, Nolte L W. A posteriori probability source localization in an uncertain sound speed, deep ocean environment. J Acoust Soc Am, 1991, 89: 2280–2284
53 Xu W, Baggeroer A B, Schmidt H. Performance analysis for matched-field source localization: simulations and experimental results. IEEE J Ocean Eng, 2006, 31: 325–344
54 Xu W, Xiao Z, Yu L. Performance analysis of matched-field source localization under spatially correlated noise field. IEEE J Ocean Eng, 2011, 36: 273–284
55 Baggeroer A B. Why did applications of MFP fail, or did we not understand how to apply MFP? In: Proceedings of the 1st Conference and Exhibition on Underwater Acoustics, Corfu island, 2013. 41–49
56 Sazontov A G, Malekhanov A I. Matched field signal processing in underwater sound channels (Review). Acoust Phys, 2015, 61: 213–230
57 Cox H. Fundamentals of bistatic active SONAR. In: Underwater Acoustic Data Processing. Berlin: Springer, 1989. 3–24
58 Carey W M, Cable P G, Cox H. Shallow water active sonar environmental acoustic issues. J Acoust Soc Am, 1993, 93: 2267
59 Zhao J W, Yan Y S, Ding W, et al. The performance and prospect of bi-static sonar. Acoust Electric Eng, 1991, 23: 29–33 [赵俊渭, 阎宜生, 丁纬, 等. 双基地声纳的性能与展望. 声学与电子工程, 1991, 23: 29–33]
60 Zhang X F, Zhao J W, Wang R Q, et al. Research on accuracy of localization algorithm for bi-static Sonar. Acta Simulata Systematica Sinica, 2003, 15: 1471–1473 [张小凤, 赵俊渭, 王荣庆, 等. 双基地声纳定位精度和算法研究. 系统仿真学报, 2003, 15: 1471–1473]
61 Yang L, Cai Z M. Analysis of detectable region for the bi-static sonar in reverberation background. J Harbin Eng Univ, 2006, 27: 597–602 [杨丽, 蔡志明. 混响背景下双基地声纳的探测范围分析. 哈尔滨工程大学学报, 2006, 27:

597–602]
62 Arii M. Ship detection from full polarimetric SAR data at different incidence angles. In: Proceedings of the 3rd International Asia-Pacific Conference on IEEE Synthetic Aperture Radar, Seoul, 2011. 1–4
63 Wilson H, Leong H. An estimation and verification of vessel radar cross sections for HF surface wave radar. IEEE Antennas Propag Mag, 2006, 48: 11–16
64 Ouchi K. Ship detection by ALOS-PALSAR: an overview. In: Proceedings of the 3rd International Asia-Pacific Conference on IEEE Synthetic Aperture Radar, Seoul, 2011. 1–2
65 Tello M, López-Martínez C, Mallorqui J J. A novel algorithm for ship detection in SAR imagery based on the wavelet transform. IEEE Geosci Remote Sens Lett, 2005, 2: 201–205
66 Wang Y, Li H, Zhang Y, et al. Marine target detection in quad-pol synthetic aperture radar imagery based on the relative phase of cross-polarized channels. J Appl Remote Sens, 2015, 9: 096092
67 Rey M T, Tunaley J K, Folinsbee J T, et al. Application of Radon transform techniques to wake detection in Seasat-A SAR images. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1990, 28: 553–560
68 Ai J, Qi X, Yu W, et al. A novel ship wake CFAR detection algorithm based on SCR enhancement and normalized Hough transform. IEEE Geosci Remote Sens Lett, 2011, 8: 681–685
69 Greidanus H, Kourti N. Findings of the DECLIMS project-detection and classification of marine traffic from space. In: Proceedings of SEASAR, Frascati, 2006. 23–26
70 Estable S, Teufel F, Petersen L, et al. Detection and classification of offshore artificial objects in TerraSAR-X images: first outcomes of the DeMarine-DEKO project. In: Proceedings OCEANS 2009 MTS/IEEE Conference and Exhibition, Bremen, 2009. 1–8
71 Wu F, Wang C, Zhang B, et al. Study on vessel classification in SAR imagery: a survey. Remote Sens Tech Appl, 2014, 29: 1–8 [吴樊, 王超, 张波, 等. SAR 图像船只分类识别研究进展. 遥感技术与应用, 2014, 29: 1–8]
72 Zhu C, Zhou H, Wang R, et al. A novel hierarchical method of ship detection from spaceborne optical image based on shape and texture features. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2010, 48: 3446–3456
73 Zhang F, Zhang L, Wu B. Progress of ship detection technology and system based on remote sensing technology in European union. J Remote Sens, 2007, 11: 552–562
74 Goferman S, Zelnic-Manor L, Tal A. Context-aware saliency detection. IEEE Trans Pattern Anal, 2012, 34: 1915–1926
75 Antelo J, Ambrosio G, Gonzalez J, et al. Ship detection and recognition in high-resolution satellite images. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, 2009. 514–517
76 Bi F K, Liu F, Gao L N. A hierarchical salient-region based algorithm for ship detection in remote sensing images. In: Advances in Neural Network Research and Applications, the series Lecture Notes in Electrical Engineering. New York: Springer, 2010. 67: 729–738
77 Perez A, Gonzalez R C. An iterative thresholding algorithm for image segmentation. IEEE Trans Pattern Anal, 1987, 9: 742–751
78 Lie W N. Automatic target segmentation by locally adaptive image thresholding. IEEE Trans Image Process, 1995, 4: 1036–1041
79 Espindola G M, Camara G, Reis I A, et al. Parameter selection for region-growing image segmentation algorithms using spatial autocorrelation. Int J Remote Sens, 2006, 27: 3035–3040
80 Zhao Y H, Wu X Q, Wen L Y, et al. Ship target detection scheme for optical remote sensing images. Opto-Electron Eng, 2008, 35: 102–106 [赵英海, 吴秀清, 闻凌云, 等. 可见光遥感图像中舰船目标检测方法. 光电工程, 2008, 35: 102–106]
81 Corbane C, Marre F, Petit M. Using SPOT-5 HRG data in panchromatic mode for operational detection of small ships in tropical area. Sensors, 2008, 8: 2959–2973
82 Maresca S, Braca P, Horstmann J, et al. Maritime surveillance with multiple over-the-horizon HFSW radars: an overview of recent experimentation. IEEE Aerosp Electron Syst Mag, 2015, 30: 4–18
83 Liu Y, Xu R, Zhang N. Progress in HFSWR research at Harbin Institute of Technology. In: Proceedings of International Radar Conference, Adelaide, 2003. 522–528
84 Ji Y G, Zhang J, Wang Y M, et al. Ship detection point association and fusion with dual-frequency HF surface wave radar. Syst Eng Electron, 2014, 36: 266–271 [纪永刚, 张杰, 王祎鸣, 等. 双频地波雷达船只目标点迹关联与融合

处理. 系统工程与电子技术, 2014, 36: 266–271]
85 Sun W F, Ji Y G, Zhang X Y, et al. Ship target tracking based on adaptive α-β filter in HFSWR. Adv Marine Sci, 2015, 33: 394–402 [孙伟峰, 纪永刚, 张晓莹, 等. 基于自适应 α-β 滤波的 HFSWR 目标航迹跟踪. 海洋科学进展, 2015, 33: 394–402]
86 Leong H. The potential of bistatic HF surface wave radar system for the surveillance of water-entry area along coastline. In: Proceedings of IEEE International Conference on Radar, Shanghai, 2006. 45: 51–65
87 Anna D, Klaus-Werner G, Hermann R, et al. Low power high frequency surface wave radar application for ship detection and tracking. In: Proceedings of IEEE International Conference on Radar. New York: IEEE, 2008. 627–632
88 Maresca S, Horstmann J, Grasso R, et al. Performance assessment of HF-radar ship detection. In: Proceedings of International Radar Symposium, Leipzig, 2011. 131–136
89 Wang Y M, Zhang J, Ji Y G, et al. CFAR ship detection verification method of HFSWR based on range-Doppler projection of AIS data. Haiyang Xuebao, 2015, 37: 76–82 [王祎鸣, 张杰, 纪永刚, 等. 基于 AIS 距离 - 多普勒投影的地波雷达 CFAR 检测验证方法. 海洋学报, 2015, 37: 76–82]
90 Dzvonkovskaya A, Gurgel K-W, Rohling H, et al. Low power high frequency surface wave radar application for ship detection and tracking. In: Proceedings of International Conference on Radar. New York: IEEE, 2008. 627–632
91 Hugh J, Roarty H, Smith M, et al. Real-time beyond the horizon vessel detection. In: Proceedings of SPIE Defense, Security, and Sensing, International Society for Optics and Photonics, Baltimore, 2013. 813–831
92 Wen B Y, Shi Y S, Yang J, et al. Target detection using multi-station HFSWR. Chin J Radio Sci, 2015, 30: 535–541 [文必洋, 石阳升, 杨静, 等. 多站高频地波雷达目标检测研究. 电波科学学报, 2015, 30: 535–541]
93 Lin M S, Zhang Y G, Yuan X Z. The development course and trend of ocean remote sensing satellite. Haiyang Xuebao, 2015, 37: 1–10 [林明森, 张有广, 袁欣哲. 海洋遥感卫星发展历程与趋势展望. 海洋学报, 2015, 37: 1–10]
94 Barrick D, Fernandez V, Ferrer M I, et al. A short-term predictive system for surface currents from a rapidly deployed coastal HF radar network. Ocean Dynam, 2012, 62: 725–740
95 Ulaby F T, Long D G, Blackwell W J, et al. Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing. Ann Arbor: the University of Michigan Press, 2014
96 Imperatore P, Riccio D. Geoscience and Remote Sensing, New Achievements. Rijeka: In-Tech, 2010
97 Lee Z, Cui T, Sun L. Derivation and application of biogeochemical properties from the measurement of water color: methods and challenges. Acta Laser Biology Sinica, 2014, 23: 481–501
98 Lu X, Hu Y, Trepte C, et al. Ocean subsurface studies with the CALIPSO spaceborne lidar. J Geophys Res Ocean, 2014, 119: 4305–4317
99 Hill V J, Zimmerman R C. Estimates of primary production by remote sensing in the arctic ocean: assessment of accuracy with passive and active sensors. Deep-Sea Res I, 2010, 57: 1243–1254
100 Liu X D, Wang L, Yang J, et al. Competitiveness analysis for China's ocean acoustic detection technologies. J Ocean Tech, 2015, 34: 80–85 [刘晓东, 王磊, 杨娟, 等. 我国海洋声学探测技术竞争力分析. 海洋技术学报, 2015, 34: 80–85]
101 Munk W, Worcester P, Wunsch C. Ocean Acoustic Tomography. Cambridge: Cambridge University Press, 1995
102 Dushaw B, Bold G, Chiu C-S, et al. Observing the ocean in the 2000s: a strategy for the role of acoustic tomography in ocean climate observation. In: Observing the Oceans in the 21st Century. Melbourne: GODAE Project Office and Bureau of Meteorology, 2001. 391–418
103 Zhao H F, Wang F Y, Zhu X H, et al. Ocean acoustic tomography: current progress and future prospect. J Ocean Tech, 2015, 34: 69–74 [赵航芳, 汪非易, 朱小华, 等. 海洋声学层析研究现状与展望. 海洋技术学报, 2015, 34: 69–74]
104 Worcester P F, Dzieciuch M A, Mercer A J, et al. The north pacific acoustic laboratory deep-water acoustic propagation experiments in the Philippine Sea. J Acoust Soc Am, 2013, 134: 3359–3375
105 Wang T, Xu W. Sparsity-based approach for ocean acoustic tomography using learned dictionaries. In: Proceedings of OCEANS MTS/IEEE Conference and Exhibition, Shanghai, 2016. 1–6
106 Makris N C. Imaging ocean-basin reverberation via inversion. J Acoust Soc Am, 1993, 94: 983–993
107 Ratilal P, Lai Y, Symonds D T, et al. Long range acoustic imaging of the continental shelf environment: the acoustic clutter Reconnaissance experiment 2001. J Acoust Soc Am, 2005, 117: 1977–1998
108 Makris N C, Ratilal P, Symonds D T, et al. Fish population and behavior revealed by instantaneous continental

shelf-scale imaging. Science, 2006, 311: 660–663
109 Makris N C, Ratilal P, Jagannathan S, et al. Critical population density triggers rapid shoal formation in vast oceanic fish shoals. Science, 2009, 323: 1734–1737
110 Cella M U, Johnstone R, Shuley N. Electromagnetic wave wireless communication in shallow water coastal environment: Theoretical analysis and experimental results. In: Proceedings the 4th ACM International Workshop on UnderWater Networks. New York: ACM, 2009. 1–9
111 Stojanovic M. Acoustic (underwater) communications. In: Proakis J G, eds. Encyclopedia of Telecommunications. Hoboken: John Wiley and Sons, 2003
112 Anguita D, Brizzolara D, Parodi G, et al. Optical wireless underwater communication for AUV: preliminary simulation and experimental results. In: Proceedings of OCEANS 2011 MTS/IEEE Conference and Exhibition, Santander, 2011. 1–5
113 Fletcher A S, Hamilton S A, Moores J D. Undersea laser communication with narrow beams. IEEE Commun Mag, 2015, 11: 49–55
114 Liu J T, Chen W B. Feasibility study of laser communications from satellite to submerged platform. Acta Optica Sinica, 2006, 26: 1441–1446 [刘金涛, 陈卫标. 星载激光对水下平台通信可行性研究. 光学学报, 2006, 26: 1441–1446]
115 Tian B, Zhang F, Tan X. Design and development of an LED-based optical communication system for autonomous underwater robots. In: Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Wollongong, 2013. 1558–1563
116 Doniec M, Detweiler C, Vasilescu I, et al. Using optical communication for remote underwater robot operation. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, 2010. 4017–4022
117 Oubei H M, Li C, Park K-H, et al. 2.3 Gbit/s underwater wireless optical communications using directly modulated 520 nm laser diode. Opt Express, 2015, 23: 20743–20748
118 Sun M, Zheng B, Zhao L, et al. A design of the video transmission based on the underwater laser communication. In: Proceedings of OCEANS MTS/IEEE Conference and Exhibition, St. John's, 2014. 1–4
119 Green D, Rice J. Channel-tolerant FH-MFSK acoustic signaling for undersea communications and networks. IEEE J Ocean Eng, 2000, 25: 28–39
120 Melodia T, Kulhandjian H, Kuo L C, et al. Advances in underwater acoustic networking. In: Mobile Ad Hoc Networking: Cutting Edge Directions. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. 804–854
121 Kilfoyle D B, Baggeroer A B. The state of the art in underwater acoustic telemetry. IEEE J Ocean Eng, 2000, 25: 4–27
122 Stojanovic M, Beaujean P P. Acoustic Communication. In: Dhanak M R, Xiros N I, eds. Springer Handbook of Ocean Engineering, Curtin T, ed. Part B: Autonomous Ocean Vehicles and Control. Berlin: Springer, 2016
123 Freitag L, Grund M, Singh S, et al. The WHOI micro-modem: an acoustic communications and navigation system for multiple platforms. In: Proceedings of OCEANS IEEE/MTS Conference and Exhibition, Washington, 2005. 1086–1092
124 Zhou S, Wang Z. OFDM for Underwater Acoustic Communications. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd, 2014
125 Yu H, Song A, Badiey M, et al. Iterative estimation of doubly selective underwater acoustic channel using basis expansion models. Ad Hoc Netw, 2015, 34: 52–61
126 Lin N, Sun H, Cheng E, et al. Prediction based sparse channel estimation for underwater acoustic OFDM. Appl Acoust, 2015, 96: 94–100
127 Xia M, Rouseff D, Ritcey J A, et al. Underwater acoustic communication in a highly refractive environment using SC-FDE. IEEE J Ocean Eng, 2014, 39: 491–499
128 Zheng Y, Wu J, Xiao C. Turbo equalization for single-carrier underwater acoustic communications. IEEE Commun Mag, 2015, 53: 79–87
129 Roy S, Duman T M, McDonald V, et al. High rate communication for underwater acoustic channels using multiple transmitters and space-time coding: receiver structures and experimental results. IEEE J Ocean Eng, 2007, 32: 663–688
130 Vajapeyam M, Vedantan S, Mitra U. Distributed space-time cooperative schemes for underwater acoustic communications. IEEE J Ocean Eng, 2008, 33: 489–501
131 Edelman G, Hodgkiss W S, Kim S, et al. Underwater acoustic communication using time reversal. IEEE J Ocean

Eng, 2005, 30: 852–864
132 Rouseff D, Jackson D R, Fox L J, et al. Underwater acoustic communication by passive-phase conjugation: theory and experimental results. J Acoust Soc Am, 2000, 26: 821–831
133 Flynn J A, Ritcey J A, Rouseff D, et al. Multichannel equalization by decision-directed passive phase conjugation: Experimental results. IEEE J Ocean Eng, 2004, 29: 824–836
134 Zeng W, Yu Z, Xu W. Experimental demonstration of time reversal communication in doubly dispersive underwater channels. In: Proceedings of the 8th ACM International Workshop on UnderWater Networks. New York: ACM, 2013. 1–5
135 Choi J W, Riedl T, Kim K, et al. Adaptive linear turbo equalization over doubly selective channels. IEEE J Ocean Eng, 2011, 36: 473–489
136 Pelekanakis K, Chitre M. New sparse adaptive algorithms based on the natural gradient and the L0-norm. IEEE J Ocean Eng, 2013, 38: 323–332
137 Roy S, Duman T, McDonald V. Error rate improvement in underwater MIMO communications using sparse partial response equalization. IEEE J Ocean Eng, 2009, 34: 181–201
138 Wan L, Zhou H, Xu X, et al. Adaptive modulation and coding for underwater acoustic OFDM. IEEE J Ocean Eng, 2015, 40: 327–336
139 Curtin T B, Bellingham J G, Progress toward autonomous ocean sampling networks. Deep Sea Res Part II Topical Studies Oceanogr, 2009, 56: 62–67
140 Rice J, Creber B, Fletcher C, et al. Evolution of Seaweb underwater acoustic networking. In: Proceedings of OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition, Providence, 2000. 2007–2017
141 Grund M, Freitag L, Preisig J, et al. The PLUSNet underwater communications system: Acoustic telemetry for undersea surveillance. In: Proceedings of OCEANS 2006 MTS/IEEE Conference and Exhibition, Boston, 2006. 1–5
142 Acar G, Adams A E. ACMENet: an underwater acoustic sensor network protocol for real-time environmental monitoring in coastal areas. IET Radar Sonar Nav, 2006, 153: 365–380
143 Chen K, Ma M, Cheng E, et al. A survey on MAC protocols for underwater wireless sensor networks. IEEE Commun Surv Tut, 2014, 16: 1433–1447
144 Syed W, Ye H, Heidemann J. T-Lohi: a new class of MAC protocols for underwater acoustic sensor networks. In: Proceedings of the 27th Conference on Computer Communications, Phoenix, 2007. 231–235
145 Petrioli R P, Cahiara, Potter J. Performance evaluation of underwater MAC protocols: from simulation to at sea testing. In: Proceedings of OCEANS 2011 MTS/IEEE Conference and Exhibition, Santander, 2011. 1–10
146 Pu L, Luo Y, Mo H, et al. Comparing underwater MAC protocols in real sea experiment. Comput Commun, 2013, 56: 1–9
147 Khalil I, Gadallah Y, Khreishah M H. An adaptive OFDMA-based MAC protocol for underwater acoustic wireless sensor networks. Sensors, 2012, 12: 8782–8805
148 Sozer E M, Stojanovic M, Proakis J G. Underwater acoustic networks. IEEE J Ocean Eng, 2000, 25: 72–83
149 Proakis J G, Sozer E M, Rice J A, et al. Shallow water acoustic networks. IEEE Commun Mag, 2001, 39: 114–119
150 Heidemann J, Stojanovic M, Zorzi M. Underwater sensor networks: applications, advances and challenges. Philos Trans R Soc A, 2012, 370: 158–175
151 Zhu Y, Peng Z, Cui J-H, et al. Toward practical MAC design for underwater acoustic networks. IEEE Trans Mobile Comput, 2015, 14: 872–886
152 Ahn J, Syed A, Krishnamachari B, et al. Design and analysis of a propagation delay tolerant ALOHA protocol for underwater networks. Ad Hoc Netw, 2011, 9: 752–766
153 Han G, Jiang J, Bao N, et al. Routing protocols for underwater wireless sensor networks. IEEE Commun Mag, 2015, 53: 72–78
154 Darehshoorzadeh A, Boukerche A. Underwater sensor networks: a new challenge for opportunistic routing protocols. IEEE Commun Mag, 2015, 53: 98–106
155 Jim P, Kurose J, Levine B N. A survey of practical issues in underwater networks. ACM SIGMOBILE Mobile Comput Commun Rev, 2007, 11: 23–33
156 He Y, Wang G H, Guan X, et al. Information Fusion Theory With Applications. Beijing: Electronics Industry Press, 2010 [何友, 王国宏, 关欣, 等. 信息融合理论及应用. 北京: 电子工业出版社, 2010]

157 Stone L D, Corwin T L, Barlow C A. Bayesian Multiple Target Tracking. Norwood: Artech House Inc, 1999
158 Hall D L, Llinas J. An introduction to multisensor data fusion. Proc IEEE, 1997, 85: 6–23
159 Khaleghi B, Khamis A, Karray F O. Multisensor data fusion: a review of the state-of-the-art. Inform Fusion, 2013, 14: 28-44
160 Han C. Multi-Source Information Fusion. Beijing: Tsinghua University Press, 2010 [韩崇昭. 多源信息融合. 北京: 清华大学出版社, 2010]
161 Yang W. Multi-sensor Data Fusion and Its Applications. Xian: Xidian University Press, 2004 [杨万海. 多传感器数据融合及其应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004]
162 Zhao Z G, Xiong Z H, Wang K, et al. Conceptions, Methods and Applications on Information Fusion. Beijing: National Defense Industry Press, 2012 [赵宗贵, 熊朝华, 王珂, 等. 信息融合概念方法与应用. 北京: 国防工业出版社, 2012]
163 Pan Q, Cheng Y M, Liang Y, et al. Multi-source Information Fusion Theory and its Applications. Beijing: Tsinghua University Press, 2013 [潘泉, 程咏梅, 梁彦, 等. 多源信息融合理论及应用. 北京: 清华大学出版社, 2013]
164 Chen D, Liu Z, Wang L, et al. Natural disaster monitoring with wireless sensor networks: a case study of data-intensive applications upon low-cost scalable systems. Mobile Netw Appl, 2013, 18: 651–663
165 Corke P, Wark T, Jurdak R, et al. Environmental wireless sensor networks. Proc IEEE, 2010, 98: 1903–1917
166 Ji Y, Zhang J, Meng J, et al. Point association analysis of vessel target detection with SAR, HFSWR and AIS. Acta Oceanol Sin, 2014, 33: 73–81
167 Liu G W, Liu Y X, Ji Y G, et al. Track association for high-frequency surface wave radar and AIS based on fuzzy double threshold theory. Syst Eng Electron, 2015, 38: 557–562 [刘根旺, 刘永信, 纪永刚, 等. 基于模糊双门限的高频地波雷达与 SAR 目标航迹关联方法. 系统工程与电子技术, 2015, 38: 557–562]
168 Xia D W, Shi S X, Yu G, et al. Study on the techniques of marine data warehouse and data mining. Marine Sci Bulletin, 2005, 24: 60–65 [夏登文, 石绥祥, 于戈, 等. 海洋数据仓库及数据挖掘技术方法研究. 海洋通报, 2005, 24: 60–65]
169 Sun C, Liu Q, Hu T, et al. Software architecture for oceanographic big data processing. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45: 134–137 [孙朝随, 刘青, 胡桐, 等. 海洋大数据处理软件体系结构设计. 中国海洋大学学报, 2015, 45: 134–137]
170 Zhang J, Cao C, Guo J, et al. Technical demands and development priorities in China's 13th five-year plan period for marine environment observing and forecasting: Case study from the North China Sea. J Ocean Tech, 2014, 33: 1–5 [张杰, 曹丛华, 郭敬天, 等. 海洋环境观测预报技术需求与 "十三五" 发展重点. 海洋技术学报, 2014, 33: 1–5]
171 Nowlin W D, Malone T C. Research and GOOS. Mar Technol Soc J, 2003, 37: 42–46
172 Mecca V F, Krolik J L. Slow-time MIMO STAP with improved power efficiency. In: Proceedings of the 41st Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, 2007. 202–206
173 Wu J, Wang T, Zhang L, et al. Range-dependent clutter suppression for airborne sidelooking radar using MIMO technique. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2012, 48: 3647–3654
174 Velotto D, Soccorsi M, Lehner S. Azimuth ambiguities removal for ship detection using full polarimetric X-band SAR data. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2014, 52: 76–88
175 Burkholder R J, Pino M R, Obelleiro F. A Monte Carlo study of the rough-sea-surface influence on the radar scattering from two-dimensional ships. IEEE Antennas Propag Mag, 2001, 43: 25–33
176 Diao G, Xu X, Ni H, et al. Synthetic aperture radar signal simulation of ships on sea surface. J Syst Simul, 2015, 27: 1989–2007 [刁桂杰, 许小剑, 倪虹, 等. 海面舰船目标 SAR 回波信号仿真. 系统仿真学报, 2015, 27: 1989–2007]
177 Yuan M. Development of remote sensing satellite and its business model. Satellite Appl, 2015, 15–19 [原民辉. 遥感卫星及其商业模式的发展. 卫星应用, 2015, 15–19]
178 Durack P J, Wijffels S E, Matear R J. Ocean salinities reveal strong global water cycle intensification during 1950 to 2000. Science, 2012, 336: 455–458
179 Brown C J, Smith S J, Lawton P, et al. Benthic habitat mapping: a review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques. Estuar Coast Shelf Sci, 2011, 92: 502–520

Marine information gathering, transmission, processing, and fusion: current status and future trends

Wen XU[1,8*], Shefeng YAN[2], Fei JI[3], Jingdong CHEN[4], Jie ZHANG[5], Hangfang ZHAO[1], Ge CHEN[6], Yongqing WU[2], Hua YU[3], Xin ZHANG[4], Xiaomei XU[7] & Huifang CHEN[1]

1 *College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou* 310027*, China*;
2 *Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190*, China*;
3 *School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou* 510641*, China*;
4 *School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an* 710072*, China*;
5 *The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao* 266061*, China*;
6 *College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao* 266100*, China*;
7 *College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen* 361005*, China*;
8 *Institute of Deep-sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya* 572000*, China*
*E-mail: wxu@zju.edu.cn

Abstract Marine information gathering, transmission, processing, and fusion play an important role in many areas, such as marine science research, environmental expedition, resource exploitation, and security and defense. Owing to its specific application environment, it has also become a popular information science research area. Like other branches of information science, the development of marine information technology over the last thirty years has benefited significantly from advances and achievements in general information theory. However, the manner in which it highlights the close bonding among propagation physics, signal processing, and the marine environment is seldom seen in other areas. This paper first gives a comprehensive overview of the current status of the theory and methods used in surface target acquisition, underwater target recognition, underwater communications and sea-air integrated information transmission, oceanic remote sensing, and data processing and information fusion. Subsequently, with the aim of helping to advance fundamental research on marine information important scientific problems to be addressed are presented.

Keywords marine information, target detection, underwater acoustic communications, synthetic aperture processing, sonar, radar, image formation, information fusion

Wen XU was born in 1967. He received the Ph.D. degree in oceanographic engineering from the Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, USA, in 2001. Currently, he is a professor at the College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, and is also a professor at the Institute of Deep-Sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences. His research interests incorporate statistical and array signal processing in general and in applications to sonar, radar, and communication systems, and most recently to underwater sensor network. He is a senior member of IEEE, an associate editor of the IEEE Journal of Oceanic Engineering, and an editorial board member of the Chinese Journal of Acoustics.

Shefeng YAN was born in 1978. He received the Ph.D. degree in electrical engineering from Northwestern Polytechnical University, Xi'an, in 2005. Currently, he is a professor at the Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences. His research interests include underwater acoustics, statistical and array signal processing, and their applications. Prof. Yan is a senior member of IEEE. He is a recipient of the National Program for Support of Top-notch Young Professionals award, as well as a recipient of the Excellent Young Scientist Fund of China award.

Fei JI was born in 1970. She received the Ph.D. degree in circuits and systems from the South China University of Technology, Guangzhou, China, in 1998. Currently, she is a professor at the School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology. She previously worked at City University of Hong Kong as a research assistant from March 2001 to July 2002. She was also a visiting scholar at University of Waterloo, Canada, from June 2009 to June 2010. Her research interests include wireless communication systems and networking, and underwater acoustics networking.

Jingdong CHEN was born in 1970. He received the Ph.D. degree in pattern recognition and intelligence control from the Chinese Academy of Sciences in 1998. He is currently a professor at Northwestern Polytechnical University (NPU), Xi'an, China. Before joining NPU, he worked at Advanced Telecommunications Research Institute International (Kyoto, Japan), Griffith University (Brisbane, Australia), and Bell Labs (Murray Hill, New Jersey), respectively, for more than 10 years. He is currently a member of the IEEE SPS TC on Audio and Acoustic Signal Processing. He received the Bell Labs Role Model Teamwork Award twice, in 2007 and 2009, and the NASA Tech Brief Award twice, in 2009 and 2010. He is also an awardee of "The-Thousand-Talents-Plan" program and a recipient of the "Distinguished Young Scientists Fund" from the National Natural Science Foundation of China (NSFC).