

## 低功耗水下物联网：愿景与关键技术

刘杨<sup>1,2</sup>, 李崔灿<sup>1,2</sup>, 彭木根<sup>1,2</sup>

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876;

2. 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

**摘要:** 随着水下传感设备的激增以及对能源节约的追求, 低功耗水下物联网的概念得以提出。受基于射频的反向散射网络启发, 低功耗水下物联网利用水声反向散射技术实现水下传感器节点低功耗、低成本通信, 在如水下长期探测等水下领域有着广泛的应用前景。首先, 介绍了低功耗水下物联网的原理与架构; 然后, 提出并分析了该架构的关键技术, 如感知、通信、组网、资源分配、安全等; 最后, 探讨了低功耗水下物联网的未来研究方向。

**关键词:** 水下物联网; 低功耗; 反向散射; 水声网络

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2022.00270

## Low-power internet of underwater things: vision and key technologies

LIU Yang<sup>1,2</sup>, LI Cuican<sup>1,2</sup>, PENG Mugen<sup>1,2</sup>

1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract:** With the explosion of underwater sensing devices and the pursuit of energy conservation, the concept of low-power internet of underwater things has been put forward. Inspired by RF-based backscatter networks, the low-power internet of underwater things architecture uses underwater acoustic backscatter technology to realize the low-power and low-cost communication of underwater sensor nodes, which has a wide application prospect in underwater fields such as the long-term underwater detection. Firstly, the principle and architecture of low-power internet of underwater things was introduced. Then, the key technologies faced by the architecture were proposed and analyzed, such as perception, communication, networking, resource allocation, security and so on. Finally, the future research directions of low-power internet of underwater things were discussed.

**Key words:** internet of underwater things, low power, backscattering, underwater acoustic network

### 0 引言

在过去的十年里, 物联网 (IoT, internet of things) 已经成为一种新兴的、有前途的技术。物联网通过连接互联网中的低功耗设备实现万物互联的愿景。物联网中有许多适用于广泛应用的解决方案。每年, 数以百万计的新 IoT 设备被部署到智能建筑、智慧制造、车联网、智慧医疗等不同的应

用领域。展望未来, 全球 IoT 支出有望在 2025 年达到 1.2 万亿美元, 其中, 中国市场规模将超过 3 000 亿美元<sup>[1]</sup>。近年来, 随着全球气候变化和资源枯竭的加剧, 海洋探测等水下技术开发和应用逐渐兴起<sup>[2]</sup>。IoT 技术的最新进展和人类对海洋的进一步探索使得水下的连接设备的数量激增。因此, 出现了由海洋传感器、摄像机、水听器等水下设备组成的水下物联网 (IoUT, internet of underwater things) 的概念<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2021-12-28; 修回日期: 2022-05-10

通信作者: 彭木根, pmg@bupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61972049)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61972049)

IoUT 的结构和功能与 IoT 类似, 是一个用于智能、互联的水下物体的全球网络, 能够监控广阔的未开发水域, 为水下数据采集、通信、传感和计算等技术开辟了许多新的研究方向。

目前, 大多数现有的水下通信系统利用光或者声传输, 通信时造成的电量消耗不可避免, 并且对于水下传感器设备而言, 电池设备的维护和更换非常复杂。因此, 电池寿命问题一直是 IoUT 面临的巨大挑战之一<sup>[4]</sup>。低功耗水下传感设备不仅能节约能源, 延长设备使用寿命, 还可用于如漏油检测等需要长期探测的海洋应用<sup>[5]</sup>。因此, 低功耗水下物联网架构得以提出, 该架构利用反向散射技术实现了水下低功耗、低成本通信。

作为一种前沿技术, 反向散射被广泛用于射频识别 (RFID, radio frequency identification)、可穿戴设备、医疗遥测和低成本传感器网络等领域。反向散射技术不需要外部电源或专用载波发射器, 而是通过利用现有的信号资源支持可持续和独立的通信。该技术是低功率无线设备普遍连接的关键促成因素, 在解决诸如传感器网络等低功耗通信系统的通信和能源效率问题方面尤其有效<sup>[6]</sup>, 为物联网的发展铺平了道路。由于水下传感器最大的能源消耗来自于无线通信<sup>[7]</sup>, 因此, 反向散射技术将降低水下传感器对电池的需求, 减小设备的尺寸和维护成本。不幸的是, 水下通信通常依赖于可以在水下长距离传播的声波信号, 而不是反向散射技术所依赖的无线电信号。由于无线电信号在水中呈指数级衰减<sup>[8]</sup>, 现有的反向散射网络在水下无法运行。为了能够在水下构建水下反向散射网络, 文献<sup>[9]</sup>利用压电效应设计了压电-水声反向散射系统, 使得系统能够在接近零功率的情况下实现水下联网。基于压电效应和反向散射技术, 低功耗 IoUT 架构得以实现。

大量增长的水下无线设备和新兴水下数据业务对水下通信的要求, 推动了近年来低功耗水下通信技术的迅速发展。低功耗 IoUT 是一种能够在接近零功率的情况下实现水下联网的全新网络架构。本文首先对低功耗 IoUT 的原理进行了全面的介绍, 包括用于实现水声反向散射的压电效应和低功耗 IoUT 整体架构设计; 然后, 从感知、通信、组网、资源分配和安全几个角度深入研究了低功耗 IoUT 的关键技术; 最后, 介绍了低功耗 IoUT 的几个待深入研究的未来方向。

## 1 低功耗 IoUT 的实现原理

由于无线电信号在水中呈指数级衰减, 现有的基于射频的反向散射网络无法在水下工作。相比之下, 水下通信通常依赖于声音信号, 这种信号可以在水下长距离传播。在低功耗 IoUT 中, 传感器节点将压电材料作为反射器, 从而实现反向散射声学信号。反向散射声学信号是低功耗 IoUT 中的核心通信技术。为使读者深入了解低功耗 IoUT 的工作原理, 本节介绍在水下环境中实现反向散射声信号的基本物理原理, 包括压电效应、电致伸缩效应、压电陶瓷和水声换能器, 并描述水声反向散射通信系统的实现原理。

### 1.1 反向散射声信号的基本物理原理

#### 1) 压电效应

某些介质材料受到一定方向的外力作用, 不仅会变形, 而且还会产生电极化现象。在这个过程中, 电荷相反的两个表面会发生电位差。当外力消失后, 晶体会恢复到不带电的状态。此外, 当外力方向改变时, 电荷的极性也会发生变化。晶体上的力产生的电荷数与力的大小成正比。这种现象被称为正压电效应。当电场沿着电介质的极化方向施加时, 电介质也会变形并产生机械应力。当电场去除后, 电介质的变形就会消失。这种现象称为逆压电效应。

#### 2) 电致伸缩效应

电介质在外电场作用下产生的应变与场强的平方成正比, 称为电致伸缩。这种效应是由电场中电介质的极化产生的, 其特征是应变与外部电场的方向无关。压电效应只存在于没有对称中心的晶体中, 而电致伸缩效应存在于所有的介电材料中, 不管它是非晶体还是晶体, 不管它是中心对称的还是极性的。外部电场产生的压电体的总应变是逆压电效应和电致伸缩效应的总和。

#### 3) 极化压电陶瓷

极化压电陶瓷的压电效应如图 1 所示, 图 1(a) 为电畴无序、无压电效应的非极化压电陶瓷。在极化过程之后, 每个电畴的自发极化在一定程度上根据外部电场的取向来排列。结果, 陶瓷芯片中的偏振强度不再为零。如图 1(b) 所示, 在垂直于电矩方向的两个平面上, 出现了等量的符号相反的束缚电荷, 就像一个大的电偶极子。然而, 其表面上的束缚电荷将很快被从外部或内部迁移的自由电荷中

和，形成所谓的电偶层，如图 1(c)所示。如果一个平行于极化方向的力施加到陶瓷板上，如图 1(d)所示，陶瓷将产生压缩和变形。

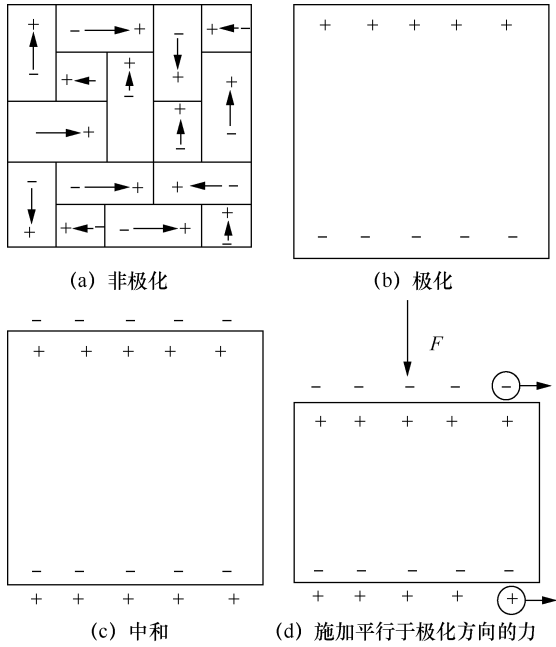


图 1 极化压电陶瓷的压电效应

极板中正负束缚电荷之间的距离变小，极化强度也变小。释放部分转移的自由电荷，使陶瓷板沿极化方向受压时放电。当力消除后，陶瓷芯片将恢复到原来的状态。芯片中正负电荷之间的距离会变大，极化强度也会变大。因此，部分电荷被电极吸收，产生充电现象。同样，当陶瓷板沿着极化方向拉伸时，就会产生充电现象。这就是极化压电陶瓷的压电效应。

#### 4) 水声换能器

利用极化压电陶瓷可以制作电声转换效率高、接收灵敏度高的压电水声换能器。换能器是一种装

置，它可以将机械振动转换成电信号，也可以产生由电场驱动的机械振动。压电水声换能器利用压电效应和电致伸缩效应的可逆性实现水声通信。

### 1.2 水声反向散射通信系统的实现原理

低功耗 IoUT 中的水声反向散射通信系统如图 2 所示，主要由发射器、水声反向散射节点（传感器节点）和水听器 3 个部分构成。发射器发送声信号给水声反向散射节点，水声反向散射节点利用水声反向散射将传感数据发送给水听器进行信号接收。具体的，水声反向散射节点利用上节提到的水声换能器的压电效应实现水下传感与通信。水声反向散射节点从发射器发送的声信号中获取能量，通过调节压电接口上的电压来在反射和吸收状态之间切换。节点分别通过吸收能量或反射声信号来传输“0”或“1”位。在吸收状态下，节点通过吸收能量来传输“0”位；在反射状态下，节点通过反射声信号来传输“1”位。水听器接收声音信号，感知由于反射而发生的振幅变化，并对这些变化进行解码以恢复传输的信息。这种切换需要的功率接近于零，并且可以完全使用采集的能量来完成，使得传感器节点无须用电池即可完成传感任务。

## 2 低功耗水下物联网架构

本节进一步结合空天地海一体化提出低功耗水下物联网的整体架构。在空天海一体化网络中，海洋无疑是组网难度最大、部署场景最复杂的部分。现有的工作主要是在空天一体化的情况下进行的，海上部分由于部署成本高、维护成本高而往往被忽视。然而，不可否认，水下传感器网络有着广阔的发展前景。海洋传感器网络如图 3 所示，一般与水面中继浮标、自主水下航行器、水下传感器等

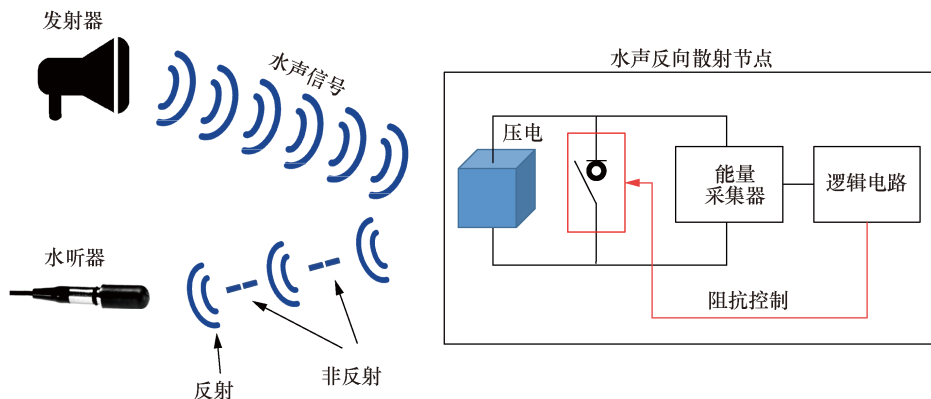


图 2 低功耗 IoUT 中的水声反向散射通信系统

一起工作。根据其制造工艺和工作特点,海洋传感器网络可以部署在不同的海底深度。当水面上的节点发出指令时,传感器网络将通过声波进行响应。

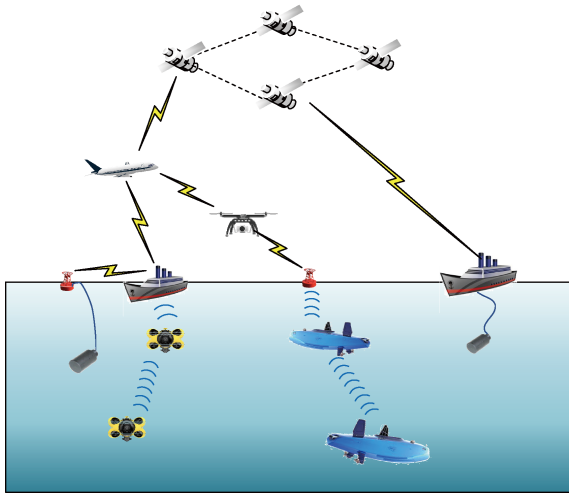


图 3 海洋传感器网络

在低功耗水下物联网中,反向散射是水下传感器技术中最热门的部分之一,它主要由发射机、传感器节点和水听器组成。当系统工作时,发射器将环境载波传输到周围环境对标签进行充电,当标签储存的能量满足标签内功能模块的启动要求时,标签会从休眠模式切换到工作模式,此时标签内部的逻辑电路会根据设计者预置的逻辑断开标签前端的匹配电路。匹配电路工作状态的变化会影响反射信号的强度,所以可以在接收端根据反射信号的强度决定匹配电路工作状态。在水声反向散射通信系统中,发射机发射的环境载波可以携带一些控制命令,如调整标签反射信号的频率、改变标签的工作状态等,这些控制命令的长度与可用的下行信道(从发射机到标签)带宽有关,在信道条件足够的情况下,可以使用控制命令来实现一些媒体访问控制(MAC, media access control)层编码和调制。

### 3 关键技术

低功耗 IoUT 的好处显而易见,它为实现 IoUT 提供了新思路,降低了水声传感器的功耗和成本。本节将从感知、通信、组网、资源分配和安全 5 个方面分析并提出低功耗 IoUT 的关键技术。

#### 3.1 感知

如何利用该机制实现水下感知是水下低功耗 IoUT 的关键技术之一。低功耗传感器节点通过在环境中反射声波信号来实现无电池设备之间的通信,其

机制与基于射频的反向散射机制类似。基于射频的反向散射机制在感知中取得了良好的性能,如微观/宏观人体运动检测和识别、机械振动检测、物品定位等。

在人体运动检测和识别方面,基于反向散射的低成本传感器常用于人体统计、活动跟踪等方面。Ding 等<sup>[10]</sup>发现标签反向散射射频信号的接收信号强度(RSS, received signal strength)值的变化随着人体目标数量的增加而增加,因而提出了一种基于反向散射的人体目标计数系统,该系统使用无源 RFID 标签,而无须在人体上安装任何设备来估计人体目标的数量。指尖轮廓射频识别器<sup>[11]</sup>设计用于防止卡丢失时被非法使用。核心原理是,当用户的指尖在通信过程中接触到标签阵列的表面时,标签阵列的反向散射信号将变得对用户而言相关且唯一。因此,成功地防止了丢失的卡被非法使用。受手运动影响的反向散射标签信号振动的启发,Ding 等<sup>[12]</sup>提出了一种人体运动检测系统,该系统不需要由人体携带设备。该系统分析来自物体上无源射频识别标签的反向散射通信信号,以检测人体是否正在接近或离开物体。

在机械振动检测方面,文献[13]首次提出使用 RFID 检测机械振动,通过使用标签的随机和低频读数来感测微观和高频振动,实现了亚毫秒级的周期性精度。为了进一步克服基于 RFID 的振动传感系统中低速率和长波长的限制,Li 等<sup>[14]</sup>提出一种基于 RFID 的振动传感系统,该系统探索标签的谐波反向散射,以精确地恢复高频和小的机械振动。

在物品定位方面,文献[15]提出了超声超分辨率成像中微泡的轴向定位方法,通过识别反向散射信号的起始点,大大提高了超分辨率精度。文献[16]提出了一种多目标主动反向散射二维定位系统,它结合了一种新的多目标到达时间和到达方向估计后处理技术和系统建模方法。文献[17]提出了一种新的室内车辆传感器融合和跟踪方法,将超高频射频识别参考标签的反向散射信号相位与低成本车载运动传感器获取的信息相结合。文献[18]提出了一种细粒度的反向散射定位技术,突破了标签的能量和记忆限制。此外,研究表明,相位是一个稳定的指标,它与标签的位置高度相关,同时受到其周期性和标签多样性的挑战。

#### 3.2 通信

反向散射通信技术以其低功耗、低成本、覆盖范围广等优点得到了广泛的研究。本节进一步根据

编码与解码、调制和解调、信号检测、信道估计等方面对反向散射通信研究进行分类。下面给出了每个区块的具体讨论。

传统反向散射通信利用 FM0、Miller 编码方案对传感数据进行编码。为了进一步提升通信性能，文献[19-21]提出了全新的编码方案。反向散射通信中无线信号经历往返双径衰落，会导致较大的路径损耗。为了解决这个问题，He 等<sup>[19]</sup>将多输入多输出 (MIMO, multiple input multiple output) 技术引入反向散射通信中，提出了一种  $2 \times 2$  空时编码，它虽然在传统信道中性能较差，但在反向散射信道中将显示出其优势，并能降低电路复杂度。类似于文献[19]，文献[20]提出了一种  $2 \times 2$  正交空时分组编码，其利用 Alamout 空时码进行简单旋转，从而改善了占空比和更好的误码率性能。Song 等<sup>[21]</sup>提出了一种 SOZU 极性编码，该编码在信道极化后使用可靠的信道进行数据传输，并设计了适用于反向散射极性编码的编解码器，以实现低功耗和高吞吐量。

不同于使用二进制通断键控 (OOK, on-off keying) 调制从反向散射标签中提取信号，文献[22-25]重新思考了经典的调制解调方案，以提高系统吞吐量、增大通信范围等为目标设计新的调制解调方案。Goudeli 等<sup>[22]</sup>在反向散射通信中引入多天技术，并在反向散射节点中引入空间调制技术，以提高系统效率和数据速率。Zhao 等<sup>[23]</sup>在基于 Wi-Fi 信号的反向散射系统中设计了编码调制方案，使用空间流工作并通过相位变化信息解码数据以避免对其他通信的影响，从而提高系统吞吐量。Guo 等<sup>[24]</sup>使用基于聚类的方法从标签中提取信号并解调，实现了灵活的链路吞吐量和广泛的通信范围。Gong 等<sup>[25]</sup>提出了一种新的叠加调制方案来解码数据包，用于高精度数据识别和宽范围通信。

在信号检测方面，Gang 等<sup>[26]</sup>提出了一个合作的环境反向散射方案，可以从环境反向散射设备和射频源恢复信息。它还可以推导出不同衰落信道下的最优最大似然检测器，并得到误码率的封闭表达式。Choi 等<sup>[27]</sup>在环境反向散射中使用正交频分复用载波，并提出了一种用于信号相干检测的信道感知匹配滤波方案，以克服载波估计的挑战。Kim 等<sup>[28]</sup>考虑了一种基于带内的独立信道 Wi-Fi 反向散射系统，该系统使用 Schmidl-Cox 检测算法来确保相邻信道帧也被监听，并实现误差矢量解调。

在信道估计方面，为了支持并发反向散射通信

并克服标签的高碰撞率，Huang 等<sup>[29]</sup>介绍了一种天线阵列，其中使用标签的物理位置来确定信道系数，而不是检测每个信道的系数，实验表明，它可以同时支持 20 个标签传输。Wei 等<sup>[30]</sup>通过设计信道检测方案获得准确的信道度量（如接收信号强度指示、分组丢失率等），利用信道分集解决吞吐量性能问题。在此基础上，为所选择的信道选择最佳数据速率。此外，他们注意到前面的工作只考虑上行链路，因此他们在文献[31-32]中关注下行链路的速率自适应，并设计了一种信道估计方法，以使用现有的 ISO18000-6C 协议有效地计算丢失率。

### 3.3 组网

反向散射节点的组网技术一直是反向散射技术的研究热点。文献[33-36]提出了在不同场景下反向散射节点的接入方案。考虑到传统的需要用户协调的多信道接入方案对于无源设备来说难以承受，Han 等<sup>[33]</sup>提出了一种随机码辅助多信道接入方案，其中每个反向散射设备独立选择一个随机码来传播其信号，并且入射信号是反向散射的。Ma 等<sup>[34]</sup>考虑一个由传统的 Wi-Fi 通信和反向散射通信组成的大规模 IoT，其目的是提出一种考虑接入点要求的高效分布式反向散射介质访问控制协议。Liu 等<sup>[35]</sup>设计了一种反向散射场全双工通信网络，解决了物联网中存在的强干扰、电池更换困难等问题。他们设计了跳频扩频多址接入方案，使无线链路中的单向无线能量传输和双向信息传输到读取器-标签上。Peng 等<sup>[36]</sup>介绍了一种使用环境 LoRa 传输作为激励信号的环境反向散射设计，通过将激励信号调制成新的标准 LoRa 信号来传输数据，并将该新信号传输到不同的 LoRa 信道，以便在远程网关接收，为无电池的物联网设备实现远程无线连接。

### 3.4 资源分配

低功耗水下物联网节点通信存在资源匮乏的问题。因此，资源分配是节点之间进行通信并提高资源利用率的有效解决方案。本文将反向散射网络的资源分配算法根据分配资源的类型分为功率资源分配算法和时间资源分配算法两大类。下文将针对不同优化目标的算法进行分析。

文献[37-40]以最大化速率、能源效率、信噪比为目标对功率进行资源分配。Chen 等<sup>[37]</sup>介绍了非正交多址接入 (NOMA, non-orthogonal multiple access) 下行链路中的反向散射协作，并假设信道状态信息不可用，以使反向散射链路更加现实，并

推导出最佳功率分配,从而提高最大化期望速率。为了实现高可靠性并最大限度地提高能源效率,Khan 等<sup>[38]</sup>将环境背向散射和 NOMA 结合起来,并考虑在不完全连续干扰解码情况下使用 Dinkelbach 算法对功率分配系数和反射散射标签的反射功率进行联合优化的问题。除此之外,在共生无线电系统中,Chu 等<sup>[39]</sup>考虑了具有有限块长的反向散射链路,提出了合作和非合作两种系统模型。然后在此基础上,利用基于半正定规划的正余弦优化算法解决了传输功率最小化和能量效率最大化两类优化问题,得到了最优资源分配。Mishra 等<sup>[40]</sup>建议在单站反向散射系统中使用全双工多输入多输出阅读器,以提高反向散射系统的通信范围,并进一步联合优化了信道估计和信息解码阶段的正交导频数量和功率分配联合优化的解析解,以最大化信噪比。

大多文献通过基于时间的资源分配提高系统吞吐量。Lyu 等<sup>[41]</sup>提出了反向散射通信系统中的中继协作方案。该方案考虑了有源中继和无源中继两种情况,相比于有源中继,无源中继需要在能量采集阶段从功率信标(PB, power beacon)中采集能量。此外,该方案为中继的反向散射时间和转发时间制定了最佳时间分配策略,以最大化系统吞吐量。Xu 等<sup>[42]</sup>设计了用户能够在主动或被动无线电模式之间切换,并联合优化 PB 的时间分配和波束形成的策略,以最大化总吞吐量。鉴于传输调度问题,Yang 等<sup>[43]</sup>根据设备的可用能量来调度其传输持续时间,以最大化系统的最小吞吐量。

除此之外,一些工作对功率和时间资源分配进行了联合优化。Hassan 等<sup>[44]</sup>考虑了一种复杂的物联网体系结构,使用了无人机中继和射频反向散射通信,其中物联网设备之间的时隙分配和跨任务功率和无人机中继的时间分配满足设备的异构服务质量。Yang 等<sup>[45]</sup>分别采用拉格朗日对偶算法和迭代算法来考虑全双工环境反向散射通信网络中单个节点和多个节点的情况。通过联合优化节点的反向散射时间分配、功率反射系数和全双工接入点的副载波功率分配,实现系统吞吐量的最大化。考虑到混合反向散射和无线功率通信的无线网络,Long 等<sup>[46]</sup>开发了一种新的协议,在发射机上进行时间和发射功率分配,以实现卓越的吞吐量性能。

### 3.5 安全

反向散射通信过程中经常涉及安全问题,文献[47-51]对反向散射系统的物理层安全问题和系统

整体安全性能进行讨论。其中文献[47-49]采用人工噪声、物理层密钥生成等物理层安全技术避免第三方窃听。Yang 等<sup>[47]</sup>提出了一种噪声注入的预编码策略,可以在计算复杂度和保密率之间取得良好平衡,在反向散射系统资源有限的情况下保证系统的安全性。文献[48]提出了一种人工噪声方案,利用射频源作为干扰器,将干扰信号发送给合法的接收机和窃听者,通过调整阅读器的人工噪声功率系数和干扰因子,可以获得最优的可靠性和安全性折中性能。与前面不同的是,文献[49]提出了一种针对资源受限的反向散射设备的有效密钥共享解决方案,该方案利用接收到的叠加环境信号在反向散射设备之间生成密钥,以保护反向散射通信免遭窃听。除此之外,文献[50-51]对系统的安全性能进行了分析。在文献[50]中,研究了前向链路和反向散射链路的信道相关性对符号误码率的影响,并比较了在单输入多输出和多输入单输出两种场景下 RFID 系统的最大比率组合接收性能。文献[51]全面研究了多天线 RFID 系统的安全速率性能。与传统的噪声注入方案不同,RFID 阅读器使用随机连续波信号来增强安全性。

## 4 未来方向

上文对有关低功耗 IoUT 的关键技术进行了全面而深入的调查。然而,低功耗 IoUT 还存在一些悬而未决的挑战,如通信吞吐量低、距离短等问题。根据挑战并寻求新的理论和技术解决方案至关重要。在这种观点下,本节讨论低功耗 IoUT 中一些可能的未来研究方向。

### 4.1 电池辅助

尽管低功耗 IoUT 为实现水下低功耗水声传感器提供了新思路,但最先进的水下反向散射技术在高信噪比(SNR, signal noise ratio)的情况下系统吞吐量也只有 20 kbit/s<sup>[52]</sup>,这远低于传统水声网络可达到的系统吞吐量(约 100 kbit/s)。低功耗水声传感器的低吞吐量问题主要是由下行信号和通过能量收集保持实现无电池的目标造成的。反向散射技术从周围的射频源收集能量。然而,只使用反向散射不能保证总是为设备获取足够的功率。因此,通过自适应切换无电池和电池辅助传输,可以保证在被动无线电模式下的稳定电源,并在主动无线电模式下实现节电<sup>[17,53]</sup>。这种混合设计在保证超低功耗反向散射通信的同时,使得传感器可以进行更高级

的信号处理与编码设计, 以实现更高的吞吐量和通信范围。

#### 4.2 传感器材料

低功耗 IoUT 中的水声传感器依靠共振压电换能器进行反向散射。其共振频率由压电陶瓷圆柱体的厚度、半径和材料组成决定。这些传感器在共振频率下发射和接收声音信号时具有很高的效率, 但是随着共振频率的移动, 它们的性能会迅速下降。因此, 传感器的带宽有限, SNR 和能量收集效率在共振频率之外显著降低。因此, 通过新兴材料改进共振压电换能器<sup>[52]</sup>也是提高低功耗 IoUT 系统吞吐量并支持远距离传输的可行方案之一。

#### 4.3 高阶调制

不同于传统的通信调制解调器, 低功耗 IoUT 中的水声传感器通过切换开关(晶体管)之间的两个终端的压电换能器来调制水下声波信号的反射。具体来说是通过在反射状态和非反射状态之间切换来传递“0”和“1”的位。因此其调制能力有限, 这也是低功耗水声传感器吞吐量低的原因之一。未来有望通过在传感器中加入高阶调制方案获得更高的吞吐量。

#### 4.4 速率自适应

受动态信道质量的影响, 速率自适应在基于射频的反向散射通信网络中至关重要<sup>[54]</sup>。相较于射频, 水声信道质量更易发生变化。并且由于水下环境复杂, 水面、水底和漂浮物体等反射的信号会引起多径传播, 加大了传感器和水听器的解调难度。而低功耗 IoUT 中的传感器从发送方的声波信号中获取的能量传输传感数据。这种低功耗特性使得通信很容易受到动态信道质量的影响。如果传感器在信道质量较差时采用较高的数据速率, 会导致吞吐量的下降。在基于射频的反向散射网络中, 速率自适应是根据动态信道条件动态切换数据传输速率的过程。受基于射频的反向散射网络启发, 速率自适应机制在确保低功耗 IoUT 的高吞吐量和可靠性中发挥着十分重要的作用。

#### 4.5 MAC 机制

类似于陆地环境中使用的基于射频的无线网络, MAC 协议是水声网络的关键要素。然而, 由于水声信道具有传播时延高、信道容量小、信道可靠性低、信道质量动态性高等特点, 现有的 MAC 协议不能很好地在低功耗 IoUT 中工作。但是, 射频无线网络中大量的 MAC 协议可以为低功耗 IoUT

提供参考方案, 未来可以结合水声网络的特殊特征和水声反向散射的特性来修改这些解决方案, 以解决低功耗 IoUT 的组网问题。

## 5 结束语

低功耗水下物联网为未来构建智慧互联的水下传感器网络、实现空天地海一体化指明了新的潜在发展方向。本文首先简要介绍了用于实现水声反向散射的压电效应的原理, 在此基础上, 提出了低功耗水下物联网的网络架构。进一步地, 针对低功耗水下物联网架构的特征, 本文分析并总结了该架构中有关感知、通信、组网、资源分配、安全等方面的关键技术。最后, 对低功耗水下物联网架构的未来研究方向作出展望。希望随着未来研究的不断深入, 该领域能够出现重大技术突破, 早日实现空天地海一体化的伟大愿景。

#### 参考文献:

- [1] IDC. IDC: 2021 下半年全球物联网支出指南发布, 中国物联网市场规模有望在 2025 年超 3 000 亿美元[EB]. 2021.  
IDC. IDC: Global IoT spending guide released for the second half of 2021, China IoT market size expected to exceed \$300 billion by 2025[EB]. 2021.
- [2] ZENG Z Q, FU S, ZHANG H H, et al. A survey of underwater optical wireless communications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(1): 204-238.
- [3] JAHANBAKHT M, XIANG W, HANZO L, et al. Internet of underwater things and big marine data analytics—A comprehensive survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(2): 904-956.
- [4] LIU E C, KAO C C, CHANG C H, et al. Internet of underwater things: challenges and routing protocols[C]//*Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1171-1174.
- [5] LLORET J. Underwater sensor nodes and networks[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2013, 13(9): 11782-11796.
- [6] VAN HUYNH N, HOANG D T, LU X, et al. Ambient backscatter communications: a contemporary survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 2889-2922.
- [7] WANG H, WANG S L, ZHANG E Y, et al. An energy balanced and lifetime extended routing protocol for underwater sensor networks[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2018, 18(5): 1596.
- [8] LIU L B, ZHOU S L, CUI J H. Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2008, 8(8): 977-994.
- [9] JANG J, ADIB F. Underwater backscatter networking[C]//*SIGCOMM '19: Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication*. New York: ACM Press, 2019: 187-199.
- [10] DING H, HAN J S, LIU A X, et al. Counting human objects using

- backscattered radio frequency signals[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2019, 18(5): 1054-1067.
- [11] ZHAO C, LI Z J, DING H, et al. A fingertip profiled RF identifier[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2022, 21(2): 392-407.
- [12] DING H, QIAN C, HAN J S, et al. Close-proximity detection for hand approaching using backscatter communication[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2019, 18(10): 2285-2297.
- [13] YANG L, LI Y, LIN Q Z, et al. Making sense of mechanical vibration period with sub-millisecond accuracy using backscatter signals[C]//*Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New York: ACM Press, 2016:16-28.
- [14] LI P, AN Z L, YANG L, et al. RFID harmonic for vibration sensing[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2021, 20(4): 1614-1626.
- [15] CHRISTENSEN-JEFFRIES K, HARPUR S, BROWN J, et al. Micro-bubble axial localization errors in ultrasound super-resolution imaging[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2017, 64(11): 1644-1654.
- [16] WANG K D, GU J F, REN F C, et al. A multitarget active backscattering 2-D positioning system with super resolution time series post-processing technique[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(5): 1751-1766.
- [17] ROSTAMI M, GUMMESON J, KIAGHADI A, et al. Polymorphic radios: a new design paradigm for ultra-low power communication[C]//*Proceedings of the 2018 Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication*. New York: ACM, 2018: 446-460.
- [18] LIU T C, LIU Y H, YANG L, et al. BackPos: high accuracy backscatter positioning system[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2016, 15(3): 586-598.
- [19] HE C, LUAN H X, LI X Y, et al. A simple, high-performance space-time code for MIMO backscatter communications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(4): 3586-3591.
- [20] LUAN H X, XIE X, HAN L Y, et al. A better than alamouti OSTBC for MIMO backscatter communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(2): 1117-1131.
- [21] SONG G C, WANG W, YANG H, et al. Exploiting channel polarization for reliable wide-area backscatter networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 5549, PP(99): 1.
- [22] GOUDEL I E, PSOMAS C, KRIKIDIS I. Spatial-modulation-based techniques for backscatter communication systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 10623-10634.
- [23] ZHAO J, GONG W, LIU J C. Spatial stream backscatter using commodity WiFi[C]//*Proceedings of the 16th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*. New York: ACM, 2018: 191-203.
- [24] GUO X Z, SHANGGUAN L F, HE Y, et al. Aloha: rethinking ON-OFF keying modulation for ambient LoRa backscatter[C]//*Proceedings of SenSys'20: Proceedings of the 18th Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. 2020: 192-204.
- [25] GONG W, YUAN L Z, WANG Q W, et al. Multiprotocol backscatter for personal IoT sensors[C]//*Proceedings of CoNEXT'20: Proceedings of the 16th International Conference on emerging Networking Experiments and Technologies*. 2020: 261-273.
- [26] YANG G, ZHANG Q Q, LIANG Y C. Cooperative ambient backscatter communications for green Internet-of-things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(2): 1116-1130.
- [27] CHOI J. Matched-filter-based backscatter communication for IoT devices over ambient OFDM carrier[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(6): 10229-10239.
- [28] KIM T, LEE W. Channel independent Wi-Fi backscatter networks[C]//*Proceedings of IEEE INFOCOM 2019 - IEEE Conference on Computer Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 262-270.
- [29] HUANG Q Y, SONG G C, WANG W, et al. FreeScatter: enabling concurrent backscatter communication using antenna arrays[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(8): 7310-7318.
- [30] GONG W, LIU H X, LIU K B, et al. Exploiting channel diversity for rate adaptation in backscatter communication networks[C]//*Proceedings of IEEE INFOCOM 2016 - The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-9.
- [31] GONG W, CHEN S, LIU J C. Towards higher throughput rate adaptation for backscatter networks[C]//*Proceedings of 2017 IEEE 25th International Conference on Network Protocols*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-10.
- [32] CHEN S, GONG W, ZHAO J, et al. High-throughput and robust rate adaptation for backscatter networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2020, 28(5): 2120-2131.
- [33] HAN S Y, LIANG Y C, SUN G L. The design and optimization of random code assisted multi-BD symbiotic radio system[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(8): 5159-5170.
- [34] MA Z J, FENG L, XU F X. Design and analysis of a distributed and demand-based backscatter MAC protocol for Internet of Things networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(1): 1246-1256.
- [35] LIU W C, HUANG K B, ZHOU X Y, et al. Full-duplex backscatter interference networks based on time-hopping spread spectrum[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(7): 4361-4377.
- [36] PENG Y, SHANGGUAN L, HU Y, et al. PLoRa: a passive long-range data network from ambient LoRa transmissions[C]//*Proceedings of the 2018 Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication*. New York: ACM Press, 2018: 147-160.
- [37] CHEN W Y, DING H Y, WANG S L, et al. Backscatter cooperation in NOMA communications systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(6): 3458-3474.
- [38] KHAN W U, JAVED M A, NGUYEN T N, et al. Energy-efficient resource allocation for 6G backscatter-enabled NOMA IoT networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 0942, PP(99): 1-11.
- [39] CHU Z, HAO W M, XIAO P, et al. Resource allocations for symbiotic radio with finite block length backscatter link[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(9): 8192-8207.
- [40] MISHRA D, LARSSON E G. Optimal channel estimation for reci-

- procity-based backscattering with a full-duplex MIMO reader[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019, 67(6): 1662-1677.
- [41] LYU B, YANGZ, GUO H Y, et al. Relay cooperation enhanced backscatter communication for Internet-of-things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 2860-2871.
- [42] XU J, LI J C, GONG S M, et al. Passive relaying game for wireless powered internet of things in backscatter-aided hybrid radio networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 8933-8944.
- [43] YANG C L, WANG X D, CHIN K W. On max-min throughput in backscatter-assisted wirelessly powered IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(1): 137-147.
- [44] HASSAN M Z, HOSSAIN M J, CHENG J L, et al. Statistical-QoS guarantee for IoT network driven by laser-powered UAV relay and RF backscatter communications[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2021, 5(1): 406-425.
- [45] YANG G, YUAN DD, LIANG Y C. Optimal resource allocation in full-duplex ambient backscatter communication networks for green IoT[J]. 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2018: 1-6.
- [46] LONG Y S, HUANG G F, TANG D, et al. Achieving high throughput in wireless networks with hybrid backscatter and wireless-powered communications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(13): 10896-10910.
- [47] YANG Q, WANG H M, ZHANG Y, et al. Physical layer security in MIMO backscatter wireless systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(11): 7547-7560.
- [48] LI X W, ZHAO M L, ZENG M, et al. Hardware impaired ambient backscatter NOMA systems: reliability and security[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(4): 2723-2736.
- [49] WANG P, JIAO L, ZENG K, et al. Physical layer key generation between backscatter devices over ambient RF signals[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2021 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-10.
- [50] ZHANG Y, GAO F F, FAN L S, et al. Backscatter communications over correlated nakagami- $m$  fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(2): 1693-1704.
- [51] YANG Q, WANG H M, YIN Q Y, et al. Exploiting randomized continuous wave in secure backscatter communications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(4): 3389-3403.
- [52] GHAFFARIVARDAVAGH R, AFZAL S S, RODRIGUEZ O, et al. Ultra-wideband underwater backscatter via piezoelectric metamaterials[C]//SIGCOMM '20: Proceedings of the Annual conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication. New York: ACM Press, 2020: 722-734.
- [53] LI D, ZHANG H, FAN L S. Adaptive mode selection for backscatter-assisted communication systems with opportunistic SIC[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(2): 2327-2331.
- [54] GONG W, LIU H X, LIU J C, et al. Channel-aware rate adaptation for backscatter networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2018, 26(2): 751-764.

### [作者简介]



刘杨（1984-），男，博士，北京邮电大学信息与通信工程学院副教授，主要研究方向为感传算一体化、低功耗水下物联网等。



李崔（1998-），女，北京邮电大学信息与通信工程学院硕士生，主要研究方向为低功耗水下物联网等。



彭木根（1978-），男，博士，北京邮电大学信息与通信工程学院教授、执行院长，教育部“长江学者”特聘教授，国家杰出青年科学基金获得者，IEEE Fellow，主要研究方向为移动通信组网等。