

## 跨协议通信技术研究进展

郭秀珍 何源

<sup>1</sup> (清华大学软件学院 北京 100084)

<sup>2</sup> (北京信息科学与技术国家研究中心 北京 100084)

<sup>1</sup> (guoxiuzhen94@gmail.com)

## Research on Cross Technology Communication

Guo Xiuzhen and He Yuan

<sup>1</sup> (School of Software, Tsinghua University, Beijing 100084)

<sup>2</sup> (Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Beijing 100084)

**Abstract** The ever-developing Internet of things (IoT) brings the prosperity of wireless sensing and control application. In many scenarios, different wireless technologies coexist in the shared frequency medium as well as the physical space. Such wireless coexistence may lead to serious cross technology interference (CTI) problems, e.g. channel competition, signal collision, throughput degradation. Compared with traditional methods like interference avoidance, tolerance and concurrency mechanism, directly and timely information exchange among heterogeneous devices is therefore a fundamental requirement to ensure the usability, inter-operability and reliability of the IoT. Under this circumstance, Cross Technology Communication (CTC) technique thus becomes a hot topic in both academic and industrial field, which aims at directly exchanging data among heterogeneous devices that follow different standards. Most of existing research works focus on the enabling technology of CTC, but lack of thinking and summary of CTC methods. Based on the survey of recent studies in CTC technology, this paper first analyzes the background and significance of CTC technology. This paper categories existing methods as two classes including packet-level CTC and physical-level CTC, and introduces the application scenarios of CTC technology. The potential research directions in this area are further discussed, which is promising to achieve cross-networks, cross-frequency, and cross-medium connections.

收稿日期: 2021-05-07; 修回日期: 2021-10-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61772306); 山西省关键核心技术和共性技术研发攻关项目(2020XXX007); 中建股份科技研发项目 (20212000460); 西安市幸福林带建设工程 PPP 项目 (20202000134)

This work was supported by the National Science Fund of China (61772306), the Research and Development Project of Key Core Technology and Generic, Technology in Shanxi Province (2020XXX007), the Research and Development Project of China Construction Engineering Corporation (20212000460), and the Smart Xingfu Lindai Project (20202000134).

通信作者: 何源 (heyuan@tsinghua.edu.cn)

**Key words** Internet of things; wireless network; protocol; heterogeneous coexistence; cross technology communication

**摘要** 随着物联网应用的广泛普及,同一区域尤其是室内环境中,各种各样无线网络协议共存的情况越来越普遍,从而导致信道竞争、信号冲突、吞吐下降等严重的干扰问题.相比于传统被动式的干扰避让、容忍和并发机制,不同无线技术之间主动进行数据共享和融合协调才是解决共存问题的关键.跨协议通信技术由此成为近年来学术界和工业界研究热点,能够实现异构设备之间直接的数据传输和信息交换.目前大部分的研究成果是针对具体的 2 种异构无线设备之间跨协议通信的使能技术,但缺少对跨协议通信方法的思考和总结.因此,在重新梳理相关研究的基础上,分析了跨协议通信技术产生的背景和研究意义,总结了现有工作提出的跨协议通信方法,包括基于数据包级别的跨协议通信技术和基于物理层级别的跨协议通信技术,并介绍了跨协议通信的相关应用场景.最后,展望了物联网技术的发展趋势,实现跨网络、跨频率、跨介质的互联互通.

**关键词** 物联网; 无线网络; 协议; 异构共存; 跨协议通信

**中图法分类号** TP393

近年来,物联网技术在应用领域受到了越来越多的关注和采用.据统计,2016 年物联网设备数量达到了 176.8 亿台,并保持 17% 的增长率.与此同时,无线技术作为物联网的基础技术之一也得到了多样化的蓬勃发展.比如,WiFi 技术被广泛应用在智能家居产品,ZigBee 技术应用在无线传感网络的监控,蓝牙设备支持低功耗的连接,LoRa 技术能覆盖公里级别的传输距离等等.

随着物联网设备和应用呈现爆发式的增长.在同一个物理空间尤其是室内环境中,各种各样无线网络协议共存的情况越来越普遍.比如在智慧工厂中,ZigBee 节点用于监控温度湿度等环境信息,RFID 标签用于监控设备的振动转角等状态信息,WiFi 路由器为巡检人员提供无线网络连接,等等.在这种不同无线技术相互共存相互融合的场景中,不同无线技术之间就会导致信道竞争、信号冲突、吞吐降低、延迟

增加等严重的共存问题.

多种异质无线网络协议共存在很多物联网应用中都是不可避免的.被动的进行冲突避让、干扰容忍和并发解码只是缓兵之策,不同无线技术之间主动进行数据共享和融合协调才是解决共存问题的突破口.在这种背景下,跨协议通信技术应运而生.多个异构设备之间能够直接的传输数据和交换信息,实现更好的网络管理、干扰控制、交互操作和组网融合等.

跨协议通信技术是近年来学术界和工业界研究热点之一,现有工作实现了 2 类跨协议通信的方法.第 1 类利用各种异构设备都能进行能量感知的共性,利用数据包级别的特征构建了数据包能量、长度、间隔、状态信息等侧信道来传输跨协议通信的比特信息.第 2 类挖掘了不同无线技术调制解调的兼容性,提出了物理层模拟的方法实现对目标信号的重构或映射.目前,跨协议通信技术已经取得了积极进展,但同时

仍有大量的开放性问题有待解决。

本文在重新梳理相关研究的基础上,分析了跨协议通信技术产生的背景和研究意义,总结了现有工作提出的跨协议通信方法,并介绍了跨协议通信的相关应用场景.最后,展望了物联网技术的发展趋势,实现更加泛在的跨网络、跨协议、跨频率的互联互通。

## 1 跨协议通信技术背景

### 1.1 无线网络的共存与融合

随着无线通信和物联网技术的蓬勃发展,使用不同无线技术的应用系统越来越多的出现和丰富了人们的日常生活.比如 WiFi<sup>[1-2]</sup>, ZigBee<sup>[3-4]</sup>, Bluetooth<sup>[5-6]</sup>, LoRa<sup>[7-8]</sup>, RFID<sup>[9-10]</sup>等无线技术广泛应用于智能家居、智能穿戴、智慧医疗和智慧工业等领域.一方面,不同的无线技术能够适应不同的系统性能要求,比如通信范围、数据率、延迟和能耗等.另一方面,这些不同的无线技术共享同一个频段的信道资源.图 1 展示了 4 种运行在 2.4GHz 频段上的无线信号的频谱分布,可以发现这 4 种信号的频段相互重叠.如果这些不同无线技术共存在同一个物理空间时,因为信道竞争和信号冲突,有可能诱发网络丢包、吞吐降低、延迟增加、频谱低效等严重的共存问题.文献[11]中展示了真实环境中 WiFi 和 ZigBee 相互干扰的情况,在不同的 WiFi 流量负载下, ZigBee 的丢包率从 0%变化到 85%。

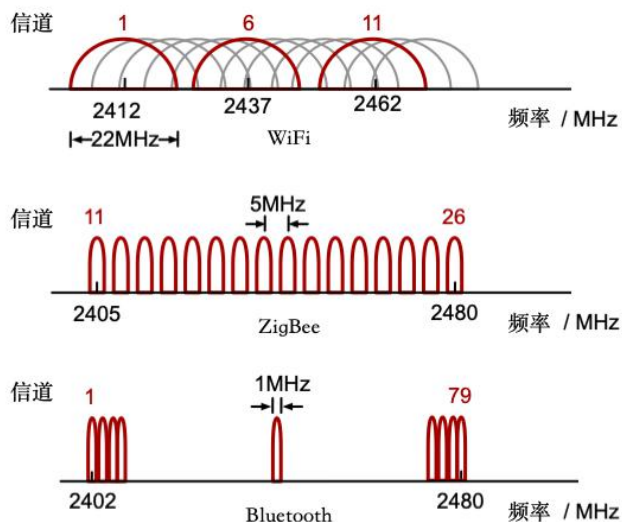


Fig. 1 Frequency distribution of common wireless technologies in 2.4GHz ISM band

图 1 常见无线技术在 2.4GHz 的频谱分布

不同的无线技术因为物理层标准的不兼容性,不能要求其他无线网络协议的配合,只能被动式的调整自己的传输策略.传统的无线共存问题<sup>[12]</sup>的解决方法包括干扰避让<sup>[13-14]</sup>、容忍<sup>[15-17]</sup>和并发机制<sup>[18-19]</sup>。

1) 避让. 避让法是尽量从时间、频率和码字 3 个方面隔离自己的信号和其他无线异质信号.载波侦听多路访问<sup>[20-21]</sup> (carrier sense multiple access, CSM) 和时分多路访问<sup>[22-23]</sup> (time division multiple access, TDMA) 是时间隔离的方法.在 CSMA 中,发射机在发送信号之前首先进行侦听检测信道是否空闲,当信道中有其他信号正在传输时,会随机后退一段时间避让干扰后再进行传输.在跳频技术<sup>[24-25]</sup>中,无线网络协议并不使用固定的信道,而是在所有可用信道上进行变化.这样不同的无线技术不会长期在某个相同的信道上停留,有效的避免干扰和冲突.另外,还可以通过编码技术,增强信号的抗干扰能力和数据包的解码率。

2) 容忍和并发机制.通常不同无线异构设备具有非对称性,比如 WiFi 的发送功率更大、竞争信道的

能力更强,低功耗设备 ZigBee 的功率较低、能力较弱.那么 WiFi 的 CSMA 监听不到远处 ZigBee 的传输不会产生避让,所以 ZigBee 信号很容易被高功率的 WiFi 干扰.当 2 个发送端的数据包到达同一个接收端时可能会存在捕获效应<sup>[26-27]</sup>,通常信号能量较高的数据包可以被成功解析.比如 ZiMo<sup>[28]</sup>中利用干扰消除技术,在 ZigBee 信号和 WiFi 信号重叠时,能够消除 WiFi 干扰成功解码出 ZigBee 信号.

## 1.2 跨协议通信技术的诞生

跨协议通信是物联网设备共存融合的大势所趋.在物联网迅猛发展的大背景下,多种异质无线网络协议共存是不可避免的.被动的进行冲突避让、干扰容忍和并发解码只是缓兵之策,不同无线技术之间主动进行数据传输和融合协调才是解决共存问题的突破口.

目前,市场上涌现出了众多网关产品,包括神州数码、艾泰、国富安等多种品牌,可以实现不同调制方式的无线信号转换,应用在工业厂房、家庭监控等场景.与此同时,市场上也有很多用于解决设备连接的软件框架平台技术,比如 Niagara 是 Tridium 公司研发的设计用于解决设备连接应的软件框架平台技术,用于提高物联网设备的互操作能力和提供统一的数据呈现.因此,实现不同无线技术之间的转换和通信是物联网设备共存融合的大势所趋.但是纯网关的设计会带来部署和维护的成本、以及双倍的通信开销,造成信道拥挤并降低整体传输效率<sup>[29-31]</sup>.因此,我们需要去除网关,无线异构设备之间实现直接的万物互联和异构融合.在这种背景下,跨协议通信技术应运而生.

跨协议通信是指 2 个异构的无线设备之间能够

实现直接的数据传输和信息交换,而不需要中间的网关.但是,实现跨协议通信也面临着很多挑战,包括信息屏障、媒介缺失和管理失衡.

首先,异质网元天然共存的“信息屏障”,不同无线技术的物理层采用不同的通信协议标准,这些标准是不兼容的.其次,这些异构网络的协同面临“媒介缺失”的问题,不同无线技术的编码调制方式不同,相应的解调解码方式也不同.最后,不同无线技术共享信道资源容易出现“管理失衡”,因为不同无线技术的带宽、速率、接收灵敏度、抗噪声干扰、抢占信道的能力是非对称的.

为了解决这些挑战,近些年涌现出了很多实现跨协议通信技术的研究工作.对跨协议通信的研究最早可以追溯到 2009 年,Chen<sup>[32]</sup>等人提出的 Esense 借助数据包能量实现了从 WiFi 到 ZigBee 的直接数据传输,揭示了跨协议通信的可行性.美国明尼苏达大学的 He 等人<sup>[33]</sup>在 2015 年的 MobiCom 会议上发表论文 FreeBee 时率先将该问题定义为跨协议通信 (cross technology communication, CTC),该团队后续也发表了一系列代表性成果,为跨协议通信方向的研究树立了标杆.随后,清华大学何源老师团队于 2016 年率先在国内系统性开展跨协议通信相关研究,团队提出的能量编码和数字模拟等方法备受国内外学者的关注和讨论.另外,国内很多其他高校例如浙江大学、北京邮电大学、西北大学、燕山大学等团队都先后开展跨协议通信相关研究.

跨协议通信的技术方向体现在以下 2 方面:一方面,对跨协议通信的研究从使能实现技术向链路层、网络层以及应用层在不断延伸和拓展;另一方面,跨协议通信技术的性能不断完善和提升,比如利用物理层信号模拟和交叉映射的方法提升数据率;通过减



小模拟误差逐步增加可靠性;寻找多种无线信号更加细粒度的共性特征来完善兼容性等。

### 1.3 跨协议通信技术的研究意义

跨协议通信技术能够实现更好的网络控制、干扰管理、交互操作和异构网络融合,能够应用在家居、工业、医疗等多种场景。

1) 智慧家庭.WiFi AP 根据场景的不同动态的给传感器节点 (ZigBee 设备) 分配不同的优先级,保证优先级高的传感器数据能高效稳定的回传到数据中心,更好的管理共存的异构无线设备<sup>[34-36]</sup>。

2) 野外森林.利用大规模传感器网络 (WSN) 监控温度湿度等环境参数,可以借助 LoRa 远距离低功耗的优势,给这些分散的传感器节点发送控制信息,从而避免传感器节点自身的多跳传输减少延迟.另外,还可以实现网络诊断,更快速准确的确定故障设备<sup>[37]</sup>。

3) 工业应用.大多数的工业控制机械制造需要多种异构设备的交互才能完成复杂的功能,为了提高控制精度减小误差,我们可以通过 WiFi 到 ZigBee 的跨协议通信技术<sup>[38]</sup>传送时间戳信息实现毫秒级别的异构网络时钟同步误差。

4) 网络安全.跨协议通信技术在实现异构设备之间直接数据传输的同时,也能让 2 个异构设备之间可以相互模仿彼此,无法区分出是同质设备还是异构设备,从而实现攻击.比如 WiFi 设备可以模拟一个蓝牙设备, WiFi 发出的从 WiFi 到蓝牙的模拟信号和蓝牙到蓝牙的数据信号非常相似,导致蓝牙接收端无法辨别,从而出现广告推送、数据窃取等安全隐私问题<sup>[39]</sup>。

5) 健康看护.借助跨协议通信技术可以实现对健康数据的更快速上传和更广泛的监控<sup>[40]</sup>。比如可以利

用广泛部署的 WiFi AP 作为蓝牙基站<sup>[41]</sup>,及时上传蓝牙手表、手环等可穿戴设备的测量数据,并且实现更加及时的帮助和救援.另外,跨协议通信技术能够为很多 IoT 设备制定高效的节能策略<sup>[42]</sup>。通常允许 WiFi 连接的设备耗电严重,很多设备会采用 802.11 的 PSM 模式关闭 WiFi 接口,来避免设备对环境中可连接 WiFi 网络的嗅探以此节能,但这种方法也让设备不能及时的连接到可用的 WiFi 网络里.在这种情况下,我们可以利用低功耗 ZigBee 传感器节点的监听模式<sup>[28]</sup>去检测是否有可用的 WiFi 网络,然后再通过 ZigBee 到 WiFi 的跨协议通信技术打开 WiFi 接口,延长电池寿命。

## 2 数据包级别的跨协议通信技术

因为物理层协议的不兼容,虽然异构无线设备之间不能直接的解调解码 (如 1.2 节分析),但是可以利用数据包级别的特征构建一个能够对收发双方同时有效的侧信道,从而传送异构设备之间的跨协议通信的数据信息.这种方法类似于 2 个说不同语言的人,虽然听不懂对方的话,但是可以通过声音的高低、一句话的长短等等来传递信息.目前,主要有基于接收信号强度 (received signal strength indicator, RSSI) 和信道状态信息 (channel state information, CSI) 2 种基于数据包级别特征的跨协议通信技术.表 1 总结了现有的数据包级别的跨协议通信技术.其中,可靠性是用来评估该技术的抗干扰能力,以及提出编码侧信道是否有应对环境干扰的机制.基于信号强度 RSSI 的侧信道比基于 CSI 的侧信道具有更高的可靠性,另外,StripComm<sup>[43]</sup>, FreeBee<sup>[33]</sup>, HoWiES<sup>[44]</sup>分别采取了曼彻斯特编码、folding 技术和多数据包编码策略来抵抗

噪声; AdaComm<sup>[45]</sup>, c-Chirp<sup>[46]</sup>, DopplerFi 分别采用了神经网络、线性调频和多子载波调制的方法来提高 CSI 的可靠性.

Table 1 Overview of Packet-Level CTC Methods

表 1 数据包级别的跨协议通信技术概览

侧信道	方法	代表工作	链路	并发传输	吞吐量/bps	可靠性
信号强度	能量	WiZig <sup>[47]</sup>	WiFi-ZigBee	不支持	154	中
		StripComm <sup>[43]</sup>	WiFi-ZigBee	不支持	1100	高
	长度	Esense <sup>[32]</sup>	WiFi-ZigBee	不支持	N/A	中
		HoWiES <sup>[44]</sup>	WiFi-ZigBee	不支持	N/A	高
	间隔	FreeBee <sup>[33]</sup>	WiFi-ZigBee	支持	31.5	高
	顺序	C-Morse <sup>[48]</sup>	WiFi-ZigBee	支持	12 ~ 137	中
		EMF <sup>[49]</sup>	WiFi-ZigBee	支持	203	中
	特征序列	PRComm <sup>[50]</sup>	WiFi-ZigBee	不支持	170 ~ 410	高
		ZigFi <sup>[51]</sup>	ZigBee-WiFi	不支持	215.9	低
		AdaComm <sup>[45]</sup>	ZigBee-WiFi	不支持	229	高
信道状态信息	波形构建	B2W2 <sup>[52]</sup>	Bluetooth-WiFi	支持	1500	低
		c-Chirp <sup>[46]</sup>	ZigBee-WiFi	不支持	90.1	高
	多普勒频偏	DopplerFi <sup>[53]</sup>	Bluetooth-WiFi	不支持	1590	高

## 2.1 基于接收信号强度的跨协议通信技术

大多数无线设备, 比如 WiFi, Bluetooth, ZigBee, LoRa 等, 都能支持接收信号强度检测的功能, 能够将收到的无线信号的信号强度直接记录下来, 而不需要将信号解码出来.收发双方可以通过信号强度信息来构建可识别的特征序列, 从而实现跨协议数据信息的传输.我们可以通过调整数据包的发送能量、长度信息, 发送间隔和顺序等来构建不同的接收信号强度序列特征.

1) 数据包能量.通过控制接收端收到的 RSSI 信息在能量强度上发生变化可以传输跨协议的数据比特.如图 2 所示, 当 WiFi 发送端有数据包传送时, ZigBee 接收端检测到的 RSSI 强度高, 可以传递跨协议比特“1”; 当 WiFi 发送端没有数据包传送时, ZigBee 接收端检测到的 RSSI 强度低, 可以传递跨协议比特“0”.但是, 数据包的有无只能在接收端出现 2 种不同的数据包能量等级(能级), 一个时间窗口内只能传送实现 1b 的跨协议数据.WiZig<sup>[47]</sup>通过在

WiFi 发送端调整不同的发送功率来在接收端实现各种不同的能级来提高数据率.比如 4 种不同的发送功率对应 4 种不同的能级,就可以传送 2b 的跨协议数据.另外,Stripcomm<sup>[43]</sup>提出将数据包能量信息进行曼彻斯特编码的方法来提高跨协议数据传输的抗干扰能力和鲁棒性.

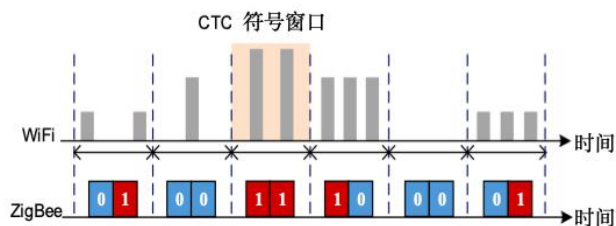


Fig. 2 Packet-level CTC based on energy

图 2 基于包能量的数据包级别跨协议通信技术

2) 数据包长度.发送端发送数据包的长度不同,使接收端收到信号强度的持续时间不同,从而可以对应不同的跨协议数据比特.如图 3 所示.Esense<sup>[32]</sup>中在发送端和接收端之间建立映射表,规定一个窗口内 100 种不同长度的数据包以及跨协议数据比特的对应关系.HoWiES<sup>[44]</sup>改进了 Esense 这种方法,能够在一个窗口传递 2744 种信息.

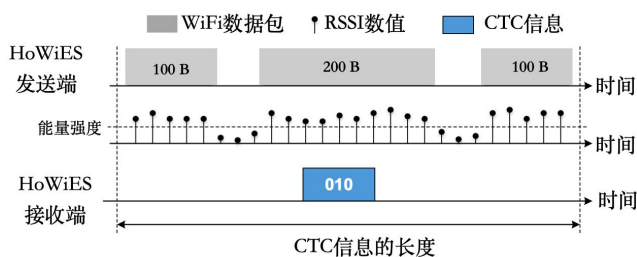


Fig. 3 Packet-level CTC based on packet size

图 3 基于包长度的数据包级别跨协议通信技术

3) 数据包间隔.通过改变广播帧的发送间隔,比如 WiFi 和 Bluetooth 的 beacon 帧,可以传递跨协议数据信息,不需要带来额外的数据包开销.比如 2 个

相邻的 WiFi 广播帧的时间间隔是 100ms, FreeBee<sup>[33]</sup>中调整了 WiFi 广播帧的广播间隔,让 ZigBee 和 Bluetooth 等接收端采集到的高电平的信号强度间隔发生变化,从而传递 WiFi 到 ZigBee 和 WiFi 到 Bluetooth 的跨协议信息.

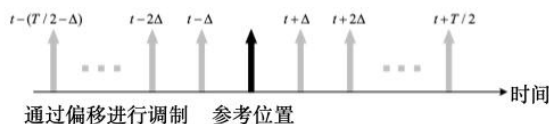


Fig. 4 Packet-level CTC based on interval

图 4 基于包间隔的数据包级别跨协议通信技术

4) 数据包顺序.控制不同数据包的发送顺序可以构建不同的信号强度序列.比如 CMorse<sup>[48]</sup>调整不同类型不同长度数据包的发送顺序,在接收端构建{短、短、长、长}、{短、长、短、长}等多种不同类型的摩斯编码序列,EMF<sup>[49]</sup>中通过调整数据包的发送顺序,改变了接收端在一个时间窗口内收到的高电平的占空比.可以用摩斯编码来改变信号占空比实现跨协议数据比特信息的传递.PRComm<sup>[50]</sup>主要考虑了同步和抗干扰 2 个需求,发送端通过改变数据包顺序来构建不同的伪随机序列提高抗干扰能力,并提出基于可识别编码特征的动态同步解码策略,容忍数据包时间误差的影响.

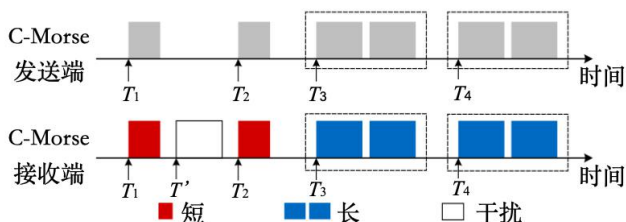


Fig. 5 Packet-level CTC based on schedule

图 5 基于包顺序的数据包级别跨协议通信技术

## 2.2 基于信道状态信息的跨协议通信技术

无线异构信号在频域上互相重叠的特性为基于信道状态信息的跨协议通信技术提供了理论支持. WiFi 802.11a/g/n 支持 20MHz 的信道宽度, 每个信道分成 64 个子信道, 信道状态信息<sup>[54]</sup>是用来指示这些子载波上信道状态, 包括幅度和相位 2 个部分. 相比于接收信号强度 RSSI, 信道状态信息 CSI 的变化更稳定, 抗干扰能力更强. 通过影响 WiFi 接收端收到的信道状态信息的特征序列、波形构建和频偏等, 可以实现跨协议通信技术.

1) 特征序列. 当 WiFi 数据包在传送过程中受到其他数据包的干扰或者影响时, CSI 序列会发生显著变化, 从而可以利用 CSI 序列实现跨协议数据的传输. 比如, 当信道中有 ZigBee 数据包传输时, ZigBee 信号会影响 WiFi 数据包的前导码, 从而使接收端收到的 CSI 序列发生变化. 因为环境信道的复杂性, CSI 的变化特征很难通过现有的公式进行量化. ZigFi<sup>[51]</sup>中提出利用支持向量机来对 CSI 序列进行判断. 如果 CSI 发生了显著变化, 则判断信道中有 ZigBee 数据包, 从 ZigBee 到 WiFi 的跨协议数据是“1”. 反之, 从 ZigBee 到 WiFi 的跨协议数据是“0”. 除了 ZigBee 信号外, 背景噪声、突发信号、多径干扰都会影响 WiFi 的 CSI 序列, AdaComm<sup>[45]</sup>利用机器学习的方法来判断 CSI 序列的特征, 从而增强了跨协议数据传输的鲁棒性和普适性.

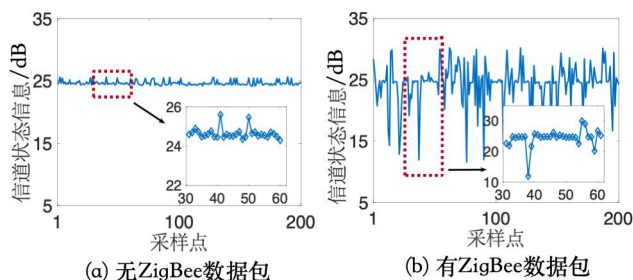


Fig. 6 CSI sequence of WiFi with and without ZigBee

图 6 有/无 ZigBee 传输情况下 WiFi 收到的 CSI 序列

2) 波形构建. 除了将 WiFi 的 CSI 是否发生变化作为特征外, 还可以通过不同的 CSI 大小构建不同的 CSI 波形来进行跨协议数据的传输. B2W2<sup>[52]</sup>中通过 Bluetooth 数据包来影响 WiFi 收到的 CSI, 通过调节不同的 Bluetooth 发送功率, 使得 WiFi 的 CSI 出现 DAFSK 的波形, WiFi 接收端根据波形的变化来解码数据. 受 LoRa 信号扩频调制技术的启发, c-Chirp<sup>[46]</sup>在不同的 ZigBee 信道上发送数据包, WiFi 接收端收到的 CSI 序列会在不同的频率上线性变化, 从而将 ZigBee 到 WiFi 跨协议通信的距离提高到 60m.

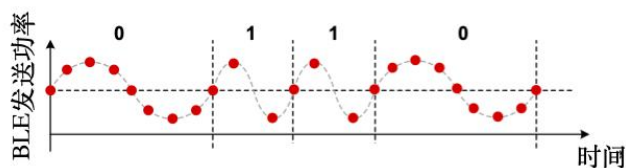


Fig. 7 DAFSK waveform constructed by WiFi CSI

图 7 利用 WiFi CSI 构建 DAFSK 波形

因为数据率受限的影响, 目前跨协议通信的研究主要集中在基于物理层信号的跨协议通信方法研究. 但是相比基于物理层信号的跨协议通信方法, 数据包级别的跨协议通信技术在通用性、兼容性和可靠性方面仍然具有较大的优势.

## 3 物理层级别的跨协议通信技术

虽然基于数据包级别的跨协议通信技术实现简单、不需要修改设备的底层硬件和 MAC 协议、有很强的兼容适配能力, 但是这种方法实现的跨协议传输



的数据率是非常有限的,通常只有几百 bps 到几 kbps.通常一个数据包的持续时间是几毫秒,所以基于数据包能量、大小、间隔和发送顺序等数据包级别特征的方法的调制粒度有限,从而限制了数据率.

为了进一步提升跨协议通信的传输效率,近年来提出基于物理层级别的跨协议通信技术,能够实现 Mbps 的数据率.按照发送端和接收端是否需要修改上层协议,我们将现有的物理层级别的跨协议通信技术分为 3 类,分别是接收端透明的、发送端透明的、非透明的跨协议通信技术.表 2 总结了现有的物理层级

别的跨协议通信技术.其中,修改程度是指对发送端或者接收端进行修改的程度,分为对软件或固件的修改以及对硬件的修改.修改程度“低”是指只需要对发送端或者接收端中的一端进行软件或固件的修改,改变发送端的发送方式或者接收端的解码规则;修改程度“中”是指需要同时在软件或固件层面对发送端的发送方式和接收端的解码规则进行修改;修改程度“高”是指我们需要对发送端和接收端的硬件进行升级改造来完成跨协议通信.

Table 2 Overview of Physical-Level CTC Methods

表 2 物理层级别的跨协议通信技术概览

方法	代表工作	链路	修改程度	并发传输	吞吐量/kbps
接收端透明	WEBee <sup>[55]</sup>	WiFi-ZigBee	低	支持	63
	PMC <sup>[56]</sup>	WiFi-ZigBee	高	支持	121.02
	WIDE <sup>[57]</sup>	WiFi-ZigBee	低	支持	247.2
	BlueBee <sup>[58]</sup>	BLE-ZigBee	低	不支持	225
发送端透明	XBee <sup>[59]</sup>	ZigBee-BLE	中	不支持	217
	LEGO-Fi <sup>[60]</sup>	ZigBee-WiFi	中	不支持	213.6
	TwinBee <sup>[61]</sup>	WiFi-ZigBee	中	支持	N/A
	LongBee <sup>[62]</sup>	WiFi-ZigBee	中	支持	N/A
非透明	Chiron <sup>[63]</sup>	WiFi-ZigBee	高	支持	223.97
	PIC <sup>[64]</sup>	WiFi-ZigBee	高	支持	121.02
	Symphony <sup>[65]</sup>	ZigBee/BLE-LoRa	中	支持	3

3.1 接收端透明的跨协议通信技术

接收端透明的跨协议通信技术是指接收端不需要任何修改就可以直接解码其他异构无线信号的方法.发送端通过适当的硬件修改或者固件升级去模拟接收端的信号.因为发送端有较强的计算能力,所以

发送端模拟出的信号和接收端想要的信号非常的相近,从而被接收端认为是合法的数据包,实现有效的接收.根据发送端模拟目标的不同,接收端透明的跨协议通信技术又可以分为对接收端时域波形的模拟和对接收端相偏序列的模拟.

1) 对时域波形的模拟.发送端通过改变数据包的内容去模拟接收端想要的时域波形,从而实现跨协议数据的有效接收和解码<sup>[66]</sup>.WEBee<sup>[55]</sup>提出了基于物理层波形模拟的方法实现从 WiFi 到 ZigBee 跨协议通信的方法.如图 8 所示, WiFi 发送端在 WiFi 数据包的 payload 域填充合适的数据比特去模拟 ZigBee 的时域波形,然后像发送正常的 WiFi 数据包一样发送模拟数据包.ZigBee 接收端将 WiFi 数据包的前导码、包头和尾部数据域认为是噪声丢弃,而 WiFi 的 payload 域满足 ZigBee 的波形要求,会被认为是合法的 ZigBee 数据包成功解码.

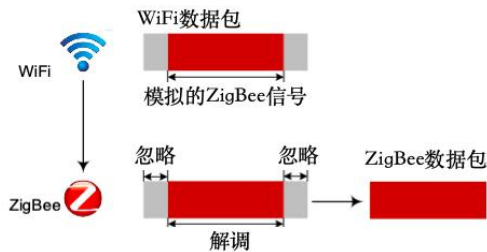


Fig. 8 Physical-level CTC based on time-domain emulation

图 8 基于时域波形模拟的物理层跨协议通信方法

这种对时域信号的模拟方法主要是通过 WiFi 发送的逆过程来实现的,如图 9 所示.假设 WiFi 发送端发出的模拟信号就是标准的接收端信号,经过过去循环前缀 (CP)、傅里叶变换、逆映射、解卷积、解交织、解扰码等操作,可以反推出来原始的数据比特.如果 WiFi 发送端将这些数据比特填充到 payload 域,那经过发送流程,就能模拟出接收端想要的时域信号,这个过程叫作 QAM 模拟.根据相似的波形模拟的思想,PMC<sup>[56]</sup>中 WiFi 发送端利用 WiFi 和 ZigBee 重叠的子载波实现对 ZigBee 信号的模拟,利用 WiFi 和 ZigBee 非重叠的子载波实现 WiFi 信号的传输.

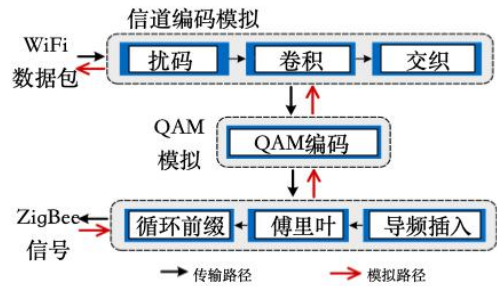


Fig. 9 Process of WiFi transmission and emulation

图 9 WiFi 端的信号发送和信号模拟流程

但是, WiFi 端模拟出的时域信号和接收端想要的时域信号之间存在模拟误差,主要来自 QAM 模拟误差和循环前缀带来的误差.一般 WiFi 中可用的 QAM 点大小和数量是固定有限的, ZigBee 信号对应的 QAM 和 WiFi 可用的 QAM 点不能重合.所以,用距离最近的 WiFi 可用 QAM 点去模拟 ZigBee 信号时,就会出现 QAM 误差.WiFi 中采用循环前缀机制,将每个 OFDM 码元的后面的 0.8us 的信号复制到码元的开头,来抵抗多径干扰的影响.但是, ZigBee 信号并没有循环前缀的约束,一个 ZigBee 符号开头和结尾的时域信号并不相同.所以, WiFi 的循环前缀也会带来模拟误差.

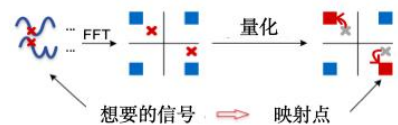


Fig. 10 QAM errors caused by time-domain emulation

图 10 由时域模拟产生的 QAM 误差

2) 对相偏序列的模拟.如前文分析,因为模拟误差, WiFi 发送端的模拟信号和 ZigBee 想要的时域信号,并不能完美的匹配和对应,所以基于时域波形的模拟方法仅能实现 50%左右的数据包接收率.另外,我们发现很多接收端是利用相位变化而不是波形来

解码的, 比如相偏大于 0 解码为 1, 相偏小于 0 解码为 0. 因此, 很多工作提出了基于相偏序列的模拟方法来提高模拟信号的接收率.

WIDE<sup>[57]</sup>首次提出了数字模拟的方法有效的减小了模拟误差, 将 WiFi 到 ZigBee 跨协议数据包的接收率提高到了 85%. ZigBee 接收端根据相偏符号实现解码. 比如比特 1 对应相偏为正, 无论是  $\pi/2$  还是  $\pi/4$  都能满足相偏为正的符号要求; 反之比特 0 对应的相偏为负. 所以, 如图 11 所示, 给定一个比特序列, 有很多种能够满足相偏要求的阶梯状相位序列. 不同的相位序列对应的 WiFi 模拟误差是不同的, 所以, WiFi 发送端能够选择模拟误差最小的相位序列进行模拟, 从而有效的提高模拟信号在接收端的接收率. BlueBee<sup>[58]</sup>实现了 Bluetooth 到 ZigBee 的跨协议数据传输, 也是依据 Bluetooth 和 ZigBee 都是利用相偏序列进行解码的原理, 虽然 Bluetooth 和 ZigBee 的时域波形不同, 但是他们产生的相偏序列是相同的.

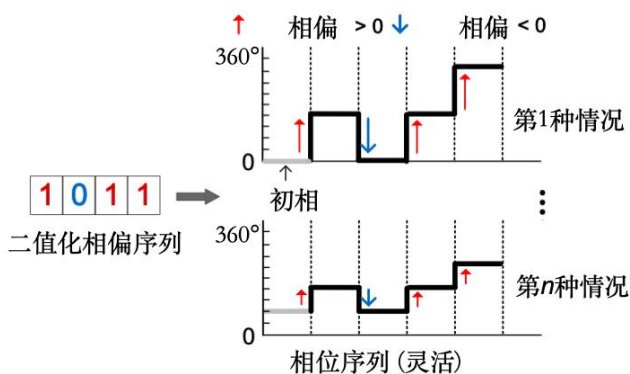


Fig. 11 Physical-level CTC based on digital emulation

图 11 基于数字模拟的物理层跨协议通信方法

### 3.2 发送端透明的跨协议通信技术

上述的接收端透明的跨协议通信技术利用发送端强大的计算能力发送模拟信号, 接收端不需要任何修改就能直接解码出发送端发送的模拟信号, 实现从

高端无线设备 (计算能力较强, 比如 WiFi) 到低端无线设备 (计算能力弱, 比如 ZigBee) 的跨协议通信技术. 反之, 如果发送端不需要做任何修改, 充分利用接收端的计算能力, 可以实现反向的从低端无线设备到高端无线设备的跨协议信息传输, 这就是发送端透明的跨协议通信技术.

发送端透明的跨协议通信技术的核心思想是交叉映射<sup>[67-68]</sup>, 通过发送端信号和接收端解码出的信号之间的映射关系, 实现跨协议信息的传输和解码. XBee<sup>[59]</sup>利用交叉映射的思想实现了从 ZigBee 到 Bluetooth 的跨协议通信技术. ZigBee 发送端利用相偏进行编码, Bluetooth 接收端也是根据相偏进行解码. 所以, 发送端发出的不同 ZigBee 信号会在 Bluetooth 解码端解码出不同的比特序列, 从而传送不同的跨协议数据. LEGO-Fi<sup>[60]</sup>通过选择重组了几个不同的 WiFi 模块, 实现了从 ZigBee 到 WiFi 的跨协议通信. ZigBee 信号经过降采样就可以通过 WiFi 的短码元检测模块而不会被直接丢弃, 把 WiFi 接收端的长码元序列替换为 ZigBee 的帧起始符可以用来确定 ZigBee 信号的起始位置, 最后利用 WiFi 的相位解码器提取相偏序列并利用 ZigBee 符号和相偏序列的映射关系实现解码.

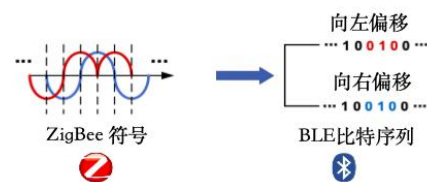


Fig. 12 Physical-level CTC based on cross-demapping

图 12 基于交叉逆映射的物理层跨协议通信方法

### 3.3 非透明的跨协议通信技术

非透明的跨协议通信技术是指发送端和接收端

都做出硬件修改或者固件升级的跨协议通信技术,这类技术通常可以用来改善跨协议通信的性能或者用来实现多路跨协议数据的并发传输的。

1) 改善跨协议通信的性能.通常采用接收端透明的跨协议通信技术,发射端发出的模拟信号会有模拟误差,从而影响跨协议模拟信号的接收率.为了提高跨协议通信的鲁棒性, TwinBee<sup>[61]</sup>在接收端探索了 ZigBee 端解码 WiFi 模拟信号得到的符号错误分布情况,并提出了码片组合的方法在接收端将错误的解码比特进行恢复.如图 13 所示,对于一个 ZigBee 码片的结果来说,容易出错的码元位置一般位于中间或者 2 端.另外, ZigBee 的码元之间存在循环移位的特点,第“ $m+2$ ”个码片向左平移 8 位后就是第“ $m$ ”个码片.比较码片“ $m$ ”和循环移位后的“ $m+2$ ”,我们发现容易出错的分布情况不同.所以接收端将码片“ $m$ ”和循环移位后的“ $m+2$ ”进行组合,可以恢复出正确的码片序列. LongBee<sup>[62]</sup>中利用 WiFi 发送端的高功率和 ZigBee 接收端的强灵敏度,将 WiFi 到 ZigBee 的跨协议通信距离延长到了 90m.

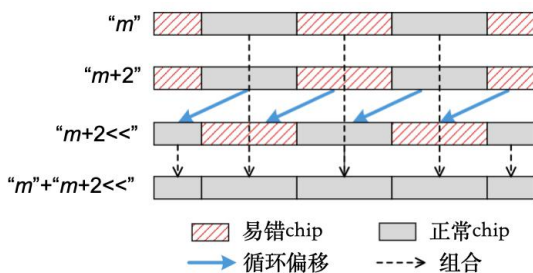


Fig. 13 The diagram of chip-combining coding in TwinBee

图 13 TwinBee 中码片组合的编码方法

2) 实现多路跨协议数据的并发传输.在文献[63]中,设计和实现了一个 Chiron 发送器和 Chiron 接收器,可同时向(或从)商用 WiFi 和 ZigBee 设备上发送(或接收) WiFi 数据和 Zigbee 数据. Chiron 发送器

利用信号模拟的方法,让生成出来的信号能够同时满足 WiFi 和 ZigBee 信号的特点. Chiron 接收端需要增加一个信号探测模块,根据 WiFi 和 ZigBee 码片速率的差异确定接收信号的类型. 单 WiFi 信号、单 ZigBee 信号和 WiFi 加 ZigBee 混合信号分别对应不同的解码算法. 类似的, PIC<sup>[64]</sup>实现了 WiFi 和 Bluetooth 之间的跨协议通信信息,发送端能同时发出 WiFi 和 Bluetooth 信号,解码端也能同时解码出 WiFi 和 Bluetooth 信号. Symphony<sup>[65]</sup>实现了 ZigBee 和 Bluetooth 信号到 LoRa 接收端的跨协议通信技术. 发送端通过控制 ZigBee 和 Bluetooth 数据包中的比特发出不同的波形序列, LoRa 的接收端利用不同的接收模版实现对 ZigBee 和 Bluetooth 信号的解码.

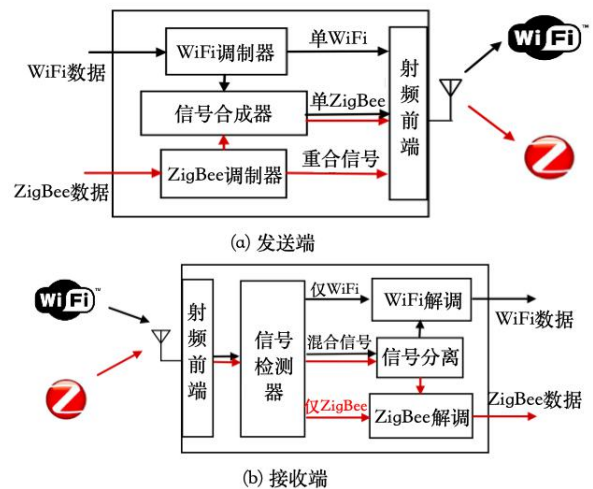


Fig. 14 The sender and the receiver of Chiron

图 14 Chiron 中的发送机和接收机流程

#### 4 现有跨协议通信技术的比较

从技术大类上,跨协议通信主要包括数据包级别的跨协议通信和物理层级别的跨协议通信技术.我们从通用性、高效性和可靠性 3 个方面对现有 2 类跨协议通信技术进行比较和分析.



首先在通用性方面,数据包级别的跨协议通信实现简单,比物理层级别的跨协议通信技术更加通用易用.数据包级别的跨协议通信利用数据包级别的特征比如数据包能量强度和信道状态信息来传递跨协议数据,绝大多数物联网设备都支持数据包能量强度和信道状态信息的获取.因此,数据包级别的跨协议通信不需要修改数据包的内容、设备的底层硬件和 MAC 协议,只需要调整发送功率就可以调制跨协议信息,具有很强的兼容适配能力.但是物理层级别的跨协议通信需要对发送端或者接收端的发包内容或者解码流程进行改动.

其次在高效性方面,物理层级别的跨协议通信技术的数据率显著高于数据包级别的跨协议通信.通常一个数据包的持续时间是几毫秒,所以数据包级别的跨协议通信对数据包能量强度、信道状态信息等特征调制粒度有限,从而限制了数据包级别的跨协议通信数据率只有几百 bps 到几 kbps.但是,物理层级别的跨协议通信技术提出波形模拟和相位模拟的方法,利用更加细粒度的波形或者相位信息来调制跨协议信息,能够将跨协议数据率提升到 Mbps.

最后在可靠性方面,数据包级别的跨协议通信比物理层级别的跨协议通信技术更加鲁棒,具有更强的抗干扰能力.数据包级别的跨协议通信方法中只要数据包没有被完全淹没到噪声和干扰信号中,就可以实现跨协议数据的传输.但是,物理层级别的跨协议通信技术对波形或者相位信号的质量要求较高,一旦噪声和干扰对波形或者相位产生影响后,就有可能导致解码错误以及丢包.因此,物理层级别的跨协议通信技术更容易受到噪声或者干扰的影响,需要利用链路层的编码策略和纠错机制来提高跨协议通信的可

靠性.

综上所述,虽然目前学术界对物理层级别的跨协议通信技术研究更为活跃,但并不意味着数据包级别的跨协议通信已落后.实际上,这 2 类技术在通用性、高效性和可靠性上各有侧重、互为补充.

5 跨协议通信技术的上层应用

之前第 2 节和第 3 节描述的方法是异构设备之间直接通信的物理层基础.除此之外,还需要考虑一些上层协议的问题才能实现更好的跨协议通信网络.比如,在数据链路层,不同能量强度的异构无线设备可能会导致跨协议隐藏终端问题;跨协议链路质量需要实时估计才能更好的进行跨协议通信参数的调整.在网络层,多种无线设备共存异构无线网络需要跨协议通信的路由协议,并且需要跨协议 ACK 机制保证网络运行的稳定性等等.表 3 总结了一些典型的上层跨协议通信工作,包括信道协调、跨协议 ACK 机制、链路质量估计、数据转发和路由等等.

Table 3 Upper Layer Application of CTC Technology

表 3 跨协议通信技术的上层应用

代表工作	划分	设计目标	链路
ECC <sup>[69]</sup>	链路层	信道协商	WiFi-ZigBee
ECT <sup>[70]</sup>	网络层	数据转发	ZigBee-WiFi
NetCTC <sup>[71]</sup>	网络层	ACK 机制	ZigBee-WiFi
CRF <sup>[72]</sup>	网络层	路由洪泛	ZigBee-WiFi
C-LQI <sup>[73]</sup>	链路层	链路质量估计	WiFi-ZigBee
X-MIMO <sup>[74]</sup>	链路层	链路质量估计	ZigBee-WiFi

5.1 信道协调

跨协议通信技术能够帮助低功耗设备更好的进行信道的选择, 在和高功率设备共存的场景下实现更好的协调信道的使用<sup>[75-76]</sup>. 跨协议通信技术能够让异构无线设备之间传递直接信道协调信息, 比如具体的信道空闲时间等等, 而不需要被动式的侦听和避让, 有效的提高了频谱利用率并减少了信号之间的干扰. G-Bee<sup>[77]</sup>中提出利用 WiFi 信号传输的保护频带去传输 ZigBee 信号. 在 ECC<sup>[69]</sup>中, WiFi 能够在 WiFi 传输过程中预留空白间隙, 并将空白间隙的时间长度直接传递给 ZigBee 设备. ZigBee 设备解码后, 可以在已知确定的空白间隙里传输 ZigBee 数据, 避免了盲目等待和随机避让, 减少了信号干扰和传输延时, 提高了信道利用率.

## 5.2 跨协议 ACK 机制

对于一个通信系统来说, 反馈机制是非常重要的. NETCTC<sup>[71]</sup>为跨协议数据传输提供了反馈机制, WiFi 设备将 WiFi 到 ZigBee 的跨协议数据包用喷泉码编码, 接收端只要能收到足够多的数据包就能保证解码的成功率. 当接收端收到足够多的模拟数据包后, 发送“CTC-ACK REQ”信号给 WiFi 设备. 这样的喷泉码加 ACK 的机制, 既能保证跨协议数据传输的稳定性和接收率, 还能减少不必要的重传, 提高传输效率.

## 5.3 链路质量估计

异构无线设备组成的异构网络的信道链路和同质网络的信道链路是不同的. 2 个异构无线设备之间的跨协议数据包, 在传输过程中除了会受到发送端和接收端之间物理信道造成的影响外, 发送端发出的模

拟数据包和接收端想要的理想数据包之间本身也存在偏差. C-LQI<sup>[73]</sup>是第 1 篇关于异构跨协议通信网络里做链路质量估计的文章, 将跨协议通信链路分为逻辑链路和物理链路 2 部分, 逻辑链路主要考虑的是跨协议的模拟数据包和理想数据包之间的模拟误差, 物理链路主要考虑的是物理信道对模拟数据包的影响. X-MIMO<sup>[74]</sup>中将信道估计和 MIMO 技术结合, 实现了 WiFi 到多个 ZigBee 的跨协议数据传输.

## 5.4 数据转发和路由

在多种无线设备共存的异构网络里, 跨协议通信技术能够实现更高效的数据转发和路由, 提升网络的传输效率和运行能力<sup>[34-36]</sup>. ECT<sup>[70]</sup>以跨协议通信技术为基础, 提出了 ZigBee 和 WiFi 共存网络里的数据转发机制. ZigBee 节点同时将重要信息和原始信息发送给 WiFi AP 和其他 ZigBee 节点. 当 WiFi AP 收到重要信息后传给服务器, 服务器将 ZigBee 网络里各个节点的优先级映射表和路由机制回传给 WiFi 设备, 并由 WiFi 设备通过跨协议通信技术传递给 ZigBee 节点. 这样 ZigBee 节点可以直接获取到不同 ZigBee 设备的优先级和路由信息, 实现更好的数据转发, 减少延迟.

## 6 未来展望

在物联网时代, 如智能交通、智能电网、智能家居、智慧城市和相似的物联网应用中, 数以亿计的智慧物体需要联网交互信息, 实现智能管理. 一个理想的物联网应用系统无疑需要所有的设备和物体都可以互联互通, 并且能够高效、实时地交换数据、分享信息. 虽然目前的研究能够实现 2 个异构无线之间的

跨协议通信技术,但是与广泛的互联互通这一愿景相比,却仍有不小的距离.在跨网络、跨频率、跨介质的通信传输等研究方向,仍存在许多开放性问题,下面作简要的分析和探讨.

### 6.1 跨网络的通信传输

反向散射通系统因为成本低、功耗小、设计简单,在物联网系统中得到了广泛的应用.一个典型的 Backscatter 系统里包括 2 个组件:一个是激励源,一个是标签.标签通过反射激励源的信号实现信息的传递.我们可以利用现有的无线设备作为激励源激活 Tag, Tag 将感知数据传送给已有的无线设备,这样既可以实现无线设备之间的数据通信,也能利用 Tag 实现低功耗感知数据的监控.

如图 15 所示,在 WiTag<sup>[78]</sup>中,客户端设备将数据包传输给 WiFi AP, Tag 端通过切换阻抗大小调整反射信号的相位.相位为 0 代表 tag 的数据是 1,相位是 180 度代表 Tag 的数据是 0.Tag 不同相位的反射信号会影响 WiFi AP 对数据包的解码, WiFi AP 通过信号叠加的结果可以解码出 Tag 的感知数据.

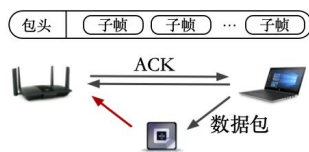


Fig. 15 The application scenario of WiTag

图 15 WiTag 的应用场景

Gatescatter<sup>[79]</sup>也利用 Tag 辅助实现了 ZigBee 传感器感知数据到 WiFi AP 的上传, Tag 利用硬件设计将 ZigBee 的 OQPSK 转换为 WiFi 802.11b 的信号,从而被 WiFi 网络有效的接收.

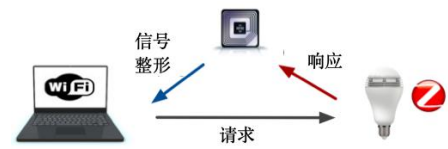


Fig. 16 The application scenario of Gatescatter

图 16 Gatescatter 的应用场景

### 6.2 跨频率的通信传输

当 2 个异构无线设备不在同一个频段时,可以利用硬件的非线性实现频移,实现跨频率的通信传输. Interscatter<sup>[80]</sup>借助 Backscatter Tag 实现不同频率的蓝牙和 WiFi 的跨协议、跨频率传输.Backscatter Tag 有 2 个作用.第一,它可以产生频率偏移,从而实现蓝牙频段和 WiFi 频段的重合.第二,通过调节标签的阻抗,可以对反射的蓝牙信号产生不同影响,从而让 WiFi 接收端得到不同的解码数据.

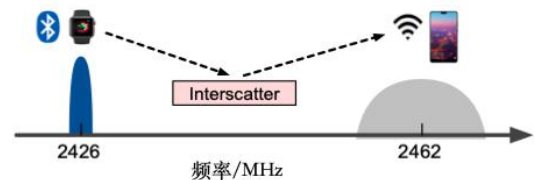


Fig. 17 The application scenario of Interscatter

图 17 Interscatter 的应用场景

TiFi<sup>[81]</sup>实现了 RFID (800MHz 到 920MHz) 到 WiFi 设备 (2.4GHz) 的跨协议、跨网络数据传输.RFID 在反射信号的过程中反射天线会产生谐波分量<sup>[82]</sup>,比如 820MHz 信号 2 次谐波是 1.64GHz, 3 次谐波是 2.46GHz.因此,可以利用这种硬件的非线性实现频率重叠.

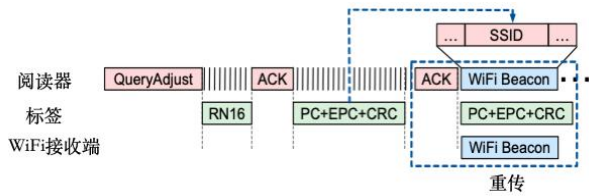


Fig. 18 Reflection of WiFi beacon by using RFID reader

图 18 利用 RFID 反射 WiFi 数据帧

### 6.3 跨介质的通信传输

现有的通信技术无法实现跨介质边界的通信,例如跨水-空气介质.因为大部分无线信号会直接在跨介质边界反射,而不会穿过水中;即使到达水中,无线信号在水中的衰减也会很大.TARF<sup>[83]</sup>这篇工作实现了水下传感器向空气中的无人机进行数据传输.TARF的设计依赖于声波的基本物理特性.水下声波传感器发出的声波信号是一种压力波,当压力波撞击水面时,会引起表面的扰动或位移.为了提取声波引起的表面,我们通过在空气中传输射频信号测量水面反射.这些反射信号随表面位移而变化.鉴于声波引起的表面振动非常微小,几微米到几十微米.TARF在空中传感器发射调频连续波(调频载波)毫米波测量反射信号的相位.AmphiLight<sup>[84]</sup>利用激光实现了反向的从空中传感器到水下接收器之间的跨介质数据传输.

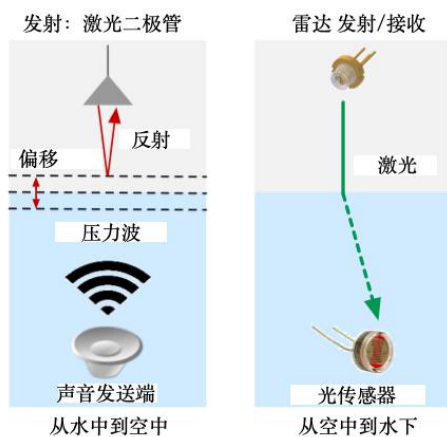


Fig. 19 The application scenario of cross-media communication

taking the air and water as an example

图 19 空气-水的跨介质通信传输

## 7 总结

本文着眼于异构无线设备的共存问题,探讨了面向物联网的跨协议通信技术.在重新梳理相关研究的基础上,对2类现有的跨协议通信方法(数据包级别的跨协议通信技术和物理层级别的跨协议通信技术)进行了分析和总结.实现万物低功耗的泛在互联是物联网世界一个长期存在的愿景,因此后续关于跨协议通信的研究主要集中在以下3个方面:1)构建更稳定的特征信号来保证跨协议通信的可靠性;2)实现更细粒度的信号控制来提高跨协议通信的数据率;3)改进通信模式来降低跨协议通信的能耗.

## 参 考 文 献

- [1] IEEE Standard Association. IEEE Standard 802.11 [S]. Piscatawat, NJ: IEEE, 2012
- [2] Zhang Diana, Wang Jingxian, Jang Junsu. On the feasibility of WiFi based material sensing [C/OL] // Proc of the 15th ACM MobiCom. New York: ACM, 2019[2021-06-05]. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3300061.3345442>
- [3] IEEE Standard Association. IEEE Standard 802.15.4 [S]. Piscatawat, NJ: IEEE, 2003
- [4] Park Y, Ha Jihun, Kim H. Enabling sensor network to smartphone interaction using software radios [J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2017, 13(2): 1-26
- [5] IEEE Standard Association. IEEE Standard 802.15.1 [S]. Piscatawat, NJ: IEEE, 2005
- [6] Sheshadri R, Sundaresan K, Chai E. BLU: Blueprinting interference for



- robust LTE access in unlicensed spectrum [C] // Proc of the 13th ACM CONEXT. New York: ACM, 2017: 15-27
- [7] Semtech. LoRa Standard [S/OL]. [2020-10-12]. <https://loro-alliance.org>.
- [8] Chen Lili, Xiong Jie, Chen Xiaojiang. WideSee: Towards wide-area contactless wireless sensing [C] // Proc of the 17th ACM SenSys. New York: ACM, 2019: 258-270
- [9] Wang Jue, Hassanieh H, Katabi D, et al. Efficient and reliable low-power backscatter networks [C] // Proc of ACM SIGCOMM. New York: ACM, 2012: 61-72 (查不到第几届)
- [10] Han Jinsong, Ding Han, Qian Chen, et al. Cbid: A customer behavior identification system using passive tags [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(5): 2885-2898
- [11] Angrisani L, Bertocco M, Fortin D, et al. Experimental study of coexistence issues between IEEE 802.11b and IEEE 802.15.4 wireless networks [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2008, 57(8):1514-1523
- [12] He Yuan, Zheng Xiaolong. Research on wireless network co-existence at 2.4GHz [J]. Journal of Computer Research and Development, 2016, 53(1): 26-37 (in Chinese)
- (何源, 郑霄龙. 2.4GHz 无线网络共存技术研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(1): 26-37)
- [13] Hung Jun, Xing Guoliang, Zhou Gang, et al. Beyond co-existence: Exploiting WiFi white space for Zigbee performance assurance [C] // Proc of the 18th IEEE ICNP. Piscatawat, NJ: IEEE, 2010: 305-314
- [14] Sha Mo, Hackmann G, Lu Chenyang. Arch: Practical channel hopping for reliable home-area sensor networks [C] // Proc of the 17th IEEE RTAS. Piscatawat, NJ: IEEE, 2011: 305-315
- [15] Jamieson K, Balakrishnan H. PPR: Partial packet recovery for wireless networks [C] // Proc of ACM SIGCOMM. New York: ACM, 2007: 409-420 (查不到第几届)
- [16] Hauer J, Willig A, Wolisz A. Mitigating the effects of RF interference through RSSI-based error recovery [C] // Proc of the 7th ACM EWSN. New York: ACM, 2010: 224-239
- [17] Liang C M, Priyantha N B, Liu Jie, et al. Surviving WiFi-interference in low power ZigBee networks [C] // Proc of the 8th ACM SenSys. New York: ACM, 2010: 309-322
- [18] Gudipati A, Katti S. Strider: Automatic rate adaptation and collision handling [C] // Proc of ACM SIGCOMM. New York: ACM, 2011: 158-169 (查不到第几届)
- [19] Gudipati A, Pereira S, Katti S. Automac: Rateless wireless concurrent medium access [C] // Proc of the 18th ACM MobiCom. New York: ACM, 2012: 5-16
- [20] Sanabria-Russo L, Barcelo J, Bellalta B, et al. A high efficiency MAC protocol for WLANs: Providing fairness in dense scenarios [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017, 25(1): 492-505
- [21] Choudhury N, Matam R, Mukherjee M, et al. Adaptive duty cycling in IEEE 802.15.4 cluster tree networks using MAC parameters [C/OL] // Proc of the 18th ACM MobiHoc. New York: ACM, 2017[2021-02-12]. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3084041.3084069>
- [22] Nabi M, Geilen M, Basten T, et al. Efficient cluster mobility support for TDMA-based MAC protocols in wireless sensor networks [J]. ACM Transactions on Sensor Network, 2014, 10(4): 1-32
- [23] Bharati S, Omar H, Zhuang W. Enhancing transmission collision detection for distributed TDMA in vehicular networks [J]. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications. 2017, 13(37): 1-21
- [24] Chang Chengshang, Liao Wanjun, Wu Tsungying. Tight lower bounds for channel hopping schemes in cognitive radio networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(4): 2343-2356
- [25] Tavakoli R, Nabi M, Basten T, et al. Dependable interference-aware time-slotted channel hopping for wireless sensor networks [J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2018, 14(3): 1-35

- [26] König M, Wattenhofer R. Effectively capturing attention using the capture effect [C] // Proc of the 14th ACM SenSys. New York: ACM, 2016: 70-82
- [27] Mohammad M, Doddavenkatappa M, Chan M. Improving performance of synchronous transmission-based protocols using capture effect over multichannels [J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2017, 13(10): 1-26
- [28] Yan Yubo, Yang Panlong, Li Xiangyang, et al. ZIMO: Building cross-technology MIMO to harmonize ZigBee smog with WiFi flash without intervention [C] // Proc of the 19th ACM MobiCom. New York: ACM, 2013: 465-476
- [29] Zachariah T, Klugman N, Campbell B, et al. The Internet of things has a gateway problem [C] // Proc of the 16th ACM HotMobile. New York: ACM, 2015: 27-32
- [30] Gedela V, Sunil M. Enabling IOT services using WiFi - ZigBee gateway for a home automation system [C] // Proc of IEEE ICRCICN. Piscatawat, NJ: IEEE, 2015: 77-80 (查不到第几届)
- [31] Shim J, Kim H, Lee N, et al. Smart home gateway system over Bluetooth low energy with wireless energy transfer capability [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2015, 1(5): 1-18
- [32] Chebrolu K, Dhekne A. Esense: Communication through energy sensing [C] // Proc of the 15th ACM MobiCom. New York: ACM, 2009: 85-96
- [33] Kim S.M, He Tian. Freebee: Cross-technology communication via free side-channel [C] // Proc of the 21st ACM MobiCom. New York: ACM, 2015: 317-330
- [34] Chi Zicheng, Li Yan, Huang Zhichuan, et al. Simultaneous bidirectional communications and data forwarding using a single ZigBee data stream [C] // Proc of IEEE INFOCOM. Piscatawat, NJ: IEEE, 2019: 577-585 (查不到第几届)
- [35] Li Yan, Chi Zicheng, Liu Xin, et al. Passive-ZigBee: Enabling ZigBee communication in IoT networks with 1000x+ less power consumption [C] // Proc of the 16th ACM SenSys. New York: ACM, 2018: 159-171
- [36] Jiang Wenchao, Yin Zhimeng, Kim S, et al. Transparent cross-technology communication over data traffic [C/OL] // Proc of IEEE INFOCOM. Piscatawat, NJ: IEEE, 2017[2021-06-05]. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8057086> (查不到第几届)
- [37] Shi Junyang, Mu Di, Mo Sha. Lorabee: Cross-technology communication from LoRa to ZigBee via payload encoding [C/OL] // Proc of the 27th IEEE ICNP. Piscatawat, NJ: IEEE, 2019[2020-08-12]. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8888145>
- [38] Yu Zihao, Jiang Chengkun, He Yuan, et al. Crocs: Cross-technology clock synchronization for WiFi and ZigBee [C] // Proc of ACM EWSN. New York: ACM, 2018: 135-144 (查不到第几届)
- [39] Chen Gonglong, Dong Wei. Jamcloak: Reactive jamming attack over cross technology communication links [C] // Proc of the 26th IEEE ICNP. Piscatawat, NJ: IEEE, 2018: 34-43
- [40] Jiang Yonghang, Li Zhenjiang, Wang Jianping. PTrack: Enhancing the applicability of pedestrian tracking with wearables [J]. IEEE/ACM Transactions on Mobile Computing, 2019, 18(2): 431-443
- [41] Liu Ruofeng, Yin Zhimeng, Jiang Wenchao, et al. WiBeacon: Expanding BLE location-based services via WiFi [C] // Proc of the 27th ACM MobiCom, New York: ACM, 2021: 15-28
- [42] Hofmann R, Boano C, Romer K. X-burst: Enabling multiplatform cross-technology communication between constrained IoT devices [C] // Proc of the 16th IEEE SECON. Piscatawat, NJ: IEEE, 2019: 97-106
- [43] Zheng Xiaolong, He Yuan, Guo Xiuzhen. Stripcomm: Interference-resilient cross-technology communication in coexisting environments [C] // Proc of IEEE INFOCOM. Piscatawat, NJ: IEEE, 2018: 171-179 (查不到第几届)
- [44] Zhang Yifan, Li Qun. Howies: A holistic approach to ZigBee assisted WiFi energy savings in mobile devices [C] // Proc of IEEE INFOCOM. Piscatawat, NJ: IEEE, 2018: 1366-1375 (查不到第几届)
- [45] Wang Weiguo, Zheng Xiaolong, He Yuan, et al. Adacomm: Tracing channel dynamics for reliable cross-technology communication [C/OL]

- // Proc of the 16th IEEE SECON. Piscatawat, NJ: IEEE, 2019[2020-05-07]. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8824>
- 843
- [46] Xia Dan, Zheng Xiaolong, Liu Liang, et al. C-chirp: Towards symmetric cross-technology communication over asymmetric channels [C/OL] // Proc of the 17th IEEE SECON. Piscatawat, NJ: IEEE, 2020[2021-01-16]. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9158411>
- [47] Guo Xiuzhen, Zheng Xiaolong, He Yuan. Wizig: Cross-technology energy communication over a noisy channel [C/OL] // Proc of IEEE INFOCOM. Piscatawat, NJ: IEEE, 2017[2020-04-18]. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8057108> (查不到第几届)
- [48] Jiang Wenchao, Yin Zhimeng, Kim S.M, et al. C-morse: Cross-technology communication with transparent Morse coding [C/OL] // Proc of IEEE INFOCOM. Piscatawat, NJ: IEEE, 2017[2020-04-18]. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8057107> (查不到第几届)
- [49] Chi Zicheng, Huang Zhichuan, Yao Yao, et al. Emf: Embedding multiple flows of information in existing traffic for concurrent communication among heterogeneous IoT devices [C/OL] // Proc of IEEE INFOCOM. Piscatawat, NJ: IEEE, 2017[2020-05-26]. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8057109> (查不到第几届)
- [50] Wang Wei, He Dingsheng, Jia Wan, et al. PRComm: Anti-interference cross-technology communication based on pseudo-random sequence [C] // Proc of the 20th IEEE IPSN. Piscatawat, NJ: IEEE, 2021: 14-26.
- [51] Guo Xiuzhen, He Yuan, Zheng Xiaolong, et al. ZigFi: Harnessing channel state information for cross-technology communication [C] // Proc of IEEE INFOCOM. Piscatawat, NJ: IEEE, 2018: 360-369 (查不到第几届)
- [52] Chi Zicheng, Li Yan, Sun Hongyu, et al. B2W2: N-way concurrent communication for IoT devices [C] // Proc of the 14th ACM SenSys. New York: ACM, 2016: 245-258
- [53] Wang Wei, He Shiyue, Sun Liang, et al. Cross-technology communications for heterogeneous IoT devices through artificial doppler shifts [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(2): 796-806
- [54] Li Zhenjiang, Xie Yaxiong, Li Mo, et al. Recitation: Rehearsing wireless packet reception in software [C] // Proc of the 21st ACM MobiCom. New York: ACM, 2015: 291-303
- [55] Li Zhijun, He Tian. Webee: Physical-layer cross-technology communication via emulation [C] // Proc of the 23rd ACM MobiCom. New York: ACM, 2017: 2-14
- [56] Chi Zicheng, Li Yan, Yao Yao, et al. Pmc: Parallel multi-protocol communication to heterogeneous IoT radios within a single WiFi channel [C] // Proc of the 25th IEEE ICNP. Piscatawat, NJ: IEEE, 2017: 31-39
- [57] Guo Xiuzhen, He Yuan, Zhang Jia, et al. Wide: Physical-level CTC via digital emulation [C] // Proc of the 18th ACM IPSN. New York: ACM, 2019: 49-60
- [58] Jiang Wenchao, Yin Zhimeng, Liu Ruofeng, et al. Bluebee: A 10,000x faster cross-technology communication via PHY emulation [C] // Proc of the 15th ACM SenSys. New York: ACM, 2017: 14-26
- [59] Jiang Wenchao, Kim S M, Li Zhijun, et al. Achieving receiver-side cross-technology communication with cross-decoding [C] // Proc of the 24th ACM MobiCom. New York: ACM, 2018: 639-652
- [60] Guo Xiuzhen, He Yuan, Zheng Xiaolong, et al. LEGO-Fi: Transmitter-transparent CTC with cross-demapping [C] // Proc of IEEE INFOCOM. Piscatawat, NJ: IEEE, 2019: 2125-2134 (查不到第几届)
- [61] Chen Yongrui, Li Zhijun, He Tian. Twinbee: Reliable physical-layer cross technology communication with symbol-level coding [C] // Proc of IEEE INFOCOM. Piscatawat, NJ: IEEE, 2018: 153-162 (查不到第几届)
- [62] Li Zhijun, He Tian. Longbee: Enabling long-range cross-technology communication [C] // Proc of IEEE INFOCOM. Piscatawat, NJ: IEEE, 2018: 162-171 (查不到第几届)
- [63] Li Yan, Chi Zicheng, Liu Xin, et al. Chiron: Concurrent high throughput communication for IoT devices [C] // Proc of the 16th ACM MobiSys.

- New York: ACM, 2018: 204-216
- [64] Chi Zicheng, Li Yan, Liu Xin, et al. Parallel inclusive communication for connecting heterogeneous IoT devices at the edge [C] // Proc of the 17th ACM SenSys. New York: ACM, 2019: 205-218
- [65] Li Zhijun, Chen Yongrui. Achieving universal low-power wide-area networks on existing wireless devices [C/OL] // Proc of the 27th IEEE ICNP. Piscatawat, NJ: IEEE, 2019[2020-05-16]. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8888066>
- [66] Liu Ruofeng, Yin Zhimeng, Jiang Wenchao, et al. Lte2b: Time-domain crosstechnology emulation under LTE constraints [C] // Proc of the 17th ACM SenSys. New York: ACM, 2019: 179-191
- [67] Wang Shuai, Kim S, He Tian. Symbol-level cross-technology communication via payload encoding [C] // Proc of the 38th IEEE ICDCS. Piscatawat, NJ: IEEE, 2018: 500-509
- [68] Li Lianggan, Chen Yongrui, Li Zhijun. Physical-layer cross-technology communication with narrow-band decoding [C/OL] // Proc of the 27th IEEE ICNP. Piscatawat, NJ: IEEE, 2019[2020-09-28]. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8888132>
- [69] Yin Zhimeng, Li Zhijun, Kim S M, et al. Explicit channel coordination via cross-technology communication [C] // Proc of the 16th ACM Mobisys. New York: ACM, 2018: 178-190
- [70] Wang Wei, Xie Tiantian, Liu Xin, et al. Ect: Exploiting cross-technology concurrent transmission for reducing packet delivery delay in IoT networks [C] // Proc of IEEE INFOCOM. Piscatawat, NJ: IEEE, 2018: 369-378 (查不到第几届)
- [71] Wang Shuai, Yin Zhimeng, Li Zhijun, et al. Networking support for physical layer cross-technology communication [C] // Proc of the 26th IEEE ICNP. Piscatawat, NJ: IEEE, 2018: 259-270
- [72] Wang Wei, Liu Xin, Yao Yao, et al. CRF: Coexistent routing and flooding using WiFi packets in heterogeneous IoT networks [C/OL] // Proc of IEEE INFOCOM. Piscatawat, NJ: IEEE, 2019[2020-08-26]. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8737525> (查不到第几届)
- [73] Zhang Jia, Guo Xiuzhen, Jiang Haotian, et al. Link quality estimation of cross-technology communication [C] // Proc of IEEE INFOCOM. Piscatawat, NJ: IEEE, 2020: 496-506 (查不到第几届)
- [74] Wang Shuai, Jeong W, Jung J, et al. X-MIMO: Cross-technology multi-user MIMO [C] // Proc of the 18th ACM SenSys. New York: ACM, 2020: 218-231
- [75] Croce D, Galioto N, Garlisi D, et al. An inter-technology communication scheme for WiFi/ZigBee coexisting networks [C] // Proc of the 14th ACM EWSN. New York: ACM, 2017: 305-310
- [76] Iqbal H, Alizai M, Qazi I, et al. Scylla: Interleaving multiple IoT stacks on a single radio [C] // Proc of the 14th ACM CoNEXT. New York: ACM, 2018: 346-352
- [77] Chae Y, Wang Shuai, Kim S M. Exploiting WiFi guard band for safeguarded ZigBee [C] // Proc of the 16th ACM SenSys. New York: ACM, 2018: 172-184
- [78] Abedi A, Dehbashi F, Mazaheri M H. Witag: Seamless WiFi backscatter communication [C] // Proc of ACM SIGCOMM. New York: ACM, 2020: 240-252 (查不到第几届)
- [79] Jung J, Ryoo J, Yi Y, et al. Gateway over the air: Toward pervasive Internet connectivity for commodity IoT [C] // Proc of the 18th ACM MobiSys. New York: ACM, 2020: 54-66
- [80] Iyer V, Talla V, Kellogg B, et al. Intertechnology backscatter: Towards Internet connectivity for implanted devices [C] // Proc of ACM SIGCOMM. New York: ACM, 2016: 356-369 (查不到第几届)
- [81] An Zhenlin, Lin Qiongzhen, Yang Lei. Cross-frequency communication: Near-field identification of UHF RFIDs with WiFi [C] // Proc of the 24th ACM MObiCom. New York: ACM, 2018: 826-828
- [82] Allane D, Vera G, Duroc Y, et al. Harmonic power harvesting system for passive RFID sensor tag [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and



Techniques, 2016, 64(7): 2347-2356

[83] Tonolini F, Adib F. Networking across boundaries: Enabling wireless communication through the water-air interface [C] // Proc of ACM SIGCOMM. New York: ACM, 2018: 117-131 (查不到第几届)

[84] Carver C, Tian Zhao, Zhang Hongyong, et al. Amphilight: Direct air-water communication with laser light [C] // Proc of the 17th USENIX NSDI. Berkeley, CA: USENIX Association, 2020: 373-388



**Guo Xiuzhen**, born in 1994. PhD. Postdoc in Tsinghua University. She is a member of CCF. Her research interests include Internet of things, wireless networks, wireless communication.

**郭秀珍**, 1994 年生. 博士后. CCF 会员. 主要研究方向为物联网、无线网络、无线通信.



**He Yuan**, born in 1980. PhD. Associate professor in the School of Software and BNRist of Tsinghua University. He is a member of ACM and a senior member of IEEE and CCF. His research interests include wireless networks, Internet of things, pervasive and mobile computing.

**何源**, 1980 年生. 清华大学长聘副教授. ACM 会员, IEEE 和 CCF 高级会员. 主要研究方向为无线网络、物联网、普适计算、移动计算.