

面向无源物联网的环境反向散射通信技术

陶琴, 钟财军, 张朝阳

(浙江大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 环境反向散射通信技术具有低功耗和低成本的特征, 是支撑无源物联网的核心使能技术之一。首先介绍了环境反向散射通信技术的概念和国内外研究现状, 然后在深入分析环境反向散射通信技术与 RFID 技术区别的基础上, 详细描述了环境反向散射通信系统面临的技术难点, 包括检测时延长、误码率高、传输速率低以及通信距离短, 进而提出了一系列潜在的解决方法, 最后对环境反向散射通信的未来研究方向进行了展望。

关键词: 无源物联网; 环境反向散射通信; 信号检测

中图分类号: TN926

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2019.00107

Ambient backscatter communications technology for batteryless IoT

TAO Qin, ZHONG Caijun, ZHANG Zhaoyang

College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract: As one of the core enabling technologies supporting the batteryless Internet of things(IoT), ambient backscattering communication technology has the characteristics of low power consumption and low cost. Firstly, the basic concept of ambient backscattering communication technology and the research status at home and abroad were introduced. Then, based on an in-depth analysis of the differences between ambient backscattering communication technology and RFID technology, the technical difficulties faced by the ambient backscattering communication system were described in detail, including large detection delay, high bit error rate, low transmission rate and short communication distance. In addition, a series of potential solutions to the challenges were proposed. Finally, the future research directions of ambient backscattering communication were prospected.

Key words: battery less IoT, ambient backscatter communication, symbol detection

1 引言

物联网 (IoT, Internet of things) 是未来无线通信系统发展的核心驱动力之一^[1-2]。预计到 2020 年, 全球将有超过 2 000 亿部设备通过物联网实现互联互通。物联网在智能家居、智慧交通、智能医疗、智能物流、智能农业、智能电力、智慧城市等众多领域都有极富前景的应用^[3]。然而, 随着对物联网技术研究的逐渐成熟和物联网日益广泛的部署, 人们越来越深切地感受到物联网在众多应用场景下

的技术难点, 即物联网中海量节点的能量供给问题: 受电源模块体积的限制, 节点的电源能量有限, 传统更换电池的方式将给大规模物联网的维护造成极高的成本, 如何有效延长网络寿命已成为物联网进一步发展的核心技术瓶颈^[4-5]。

近年来, 国内外学者针对物联网中节点的能量管理做了大量研究工作, 从而提升能量效用, 虽然在一定程度上延长了网络寿命, 但并未从根本上解决有限的电池能量这一难题。如果把能量管理视为一种“节流”机制, 那么近年提出的从周围环境中

收稿日期: 2019-04-06; 修回日期: 2019-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61671406, No.61725104)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61671406, No.61725104)

采集能量的方法就是一种新的“开源”机制。从理论上讲，物联网节点可以通过不同方式从周边环境持续不断地获取能量，用于维持节点的各项基本功能，由此彻底摆脱对电池的依赖。鉴于此，基于环境能量采集的新型无源物联网成为当前研究的热点。

目前，自然环境中可采集的能源主要有太阳能、风能、射频信号能量、振动能、生物能等多种形式，其中，太阳能、风能的采集对气候和节点安装位置有很强的依赖性且不够持续、稳定，基于振动能、生物能等形式的能量采集在很大程度上受限于应用场景因而通用性不够。相比而言，射频信号如数字电视地面广播（DTVB）信号、蜂窝无线通信系统的基站信号、Wi-Fi 信号等具有广泛、持续、稳定的覆盖性，并且在一定程度上具有更强的可控性，因此，从射频信号中获取能量有望成为一种富有前景的方式。前期的大量理论研究和原型验证结果表明，从电视塔、基站和 Wi-Fi 接入点采集的能量可达数十到数百微瓦，与当前传感器和数据收发所需能量处于同一个数量级，这为无源物联网的开发和部署奠定了理论基础。

为了拓宽无源物联网的应用范围并实现持续、稳定工作的能力，除了进一步提高无线能量收集的效率，降低物联网节点功耗也是重要方面。物联网节点功耗主要来源于传感、处理和通信三大模块，随着电子技术的飞速发展，处理模块和传感模块的功耗有望持续降低，因此，如何降低通信模块的功耗是关键所在。

传统通信系统中，收发模块是一种近似对称的架构，具有独立的射频链路，包含功率放大器和振荡器等高能耗元器件，用于产生和接收射频信号。Stockman^[6]在 1948 年提出了一种收发模块不对称的架构，即反向散射通信技术，为降低节点通信模块的功耗提供了一种新的解决思路。其基本原理是信息发送节点按照拟发送信息调整接收天线和阻抗之间的匹配，从而对入射射频信号进行不同程度的反射，而信息接收节点通过检测反射信号解调信息。如发送信息比特“1”时，调整阻抗至完全不匹配状态，此时天线反射所有信号；发送信息比特“0”时，则调整阻抗至完全匹配状态，此时天线接收所有信号。由此可见，发送节点的信息通过反射调制信号发送，而不需要主动产生射频信号，因此，可避免使用功率放大器和振荡器等高功耗元器件，极

大地降低了信息发送节点的功耗。

反向散射通信技术为无源物联网中海量低功耗节点的通信提供了有效的解决方案，受到全球众多企业的积极关注和重视。2016 年，华盛顿大学研究人员创立了 Jeeva Wireless 公司，针对可穿戴设备和智慧农业等应用，开发了超低功耗反向散射 Wi-Fi 技术；2017 年，由高通投资高达 1 900 万美元的 Wiliot 公司正式成立，面向医疗、智能包裹、服装标签、资产跟踪、室内定位和遥控器等领域的各种应用，研发了基于环境反向散射的无源物联网技术。

2 环境反向散射通信技术

反向散射通信技术经过长期研究，目前已经非常成熟，并被广泛应用于射频识别（RFID，radio frequency identification）系统中。传统 RFID 系统如图 1 所示，其基本工作过程如下：阅读器发送射频激励信号激活无源电子标签，电子标签利用反向散射通信技术将自身信息调制到该射频信号上，阅读器接收电子标签的反射信号并进行解调，从而实现阅读器和电子标签之间的信息传输。

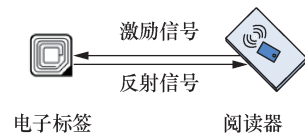


图 1 传统 RFID 系统

RFID 系统中，阅读器接收的反射信号实际上经历了双重路径损耗，信号强度较弱，限制了阅读器和电子标签之间的通信距离，已成为 RFID 系统在实际应用中的一个关键缺点。针对该问题，Kimionis 等^[7]提出了一种新型收发器分离的反向散射通信系统架构，如图 2 所示，该架构中射频发射器作为一个独立的节点，用于给电子标签发射激励信号，而阅读器仅用于接收和解调信号。由于可以灵活地调整射频发射器的位置，该架构在一定程度上缓解了路径损耗问题，从而拉近了电子标签和阅读器之间的通信距离。

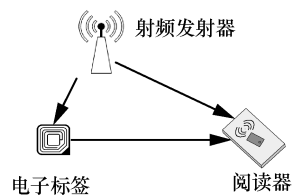


图 2 新型收发器分离的反向散射通信系统架构

采用独立的射频信号发生器虽然带来了一定的灵活性,但依然存在不少局限性,如在某些场景下无法部署以及消耗较多的能量。鉴于此,华盛顿大学 Joshua Smith 研究团队^[8]提出了基于环境射频信号的反向散射通信系统。环境反向散射通信系统如图 3 所示,该系统利用周边环境广泛存在的射频信号,如电视、蜂窝或 Wi-Fi 信号作为激励源,实现电子标签与阅读器之间的信息传输,能够大幅度降低能量消耗。

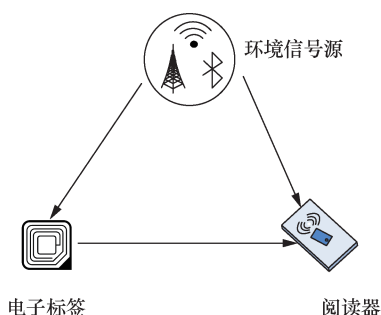


图 3 环境反向散射通信系统

与 RFID 系统相比,环境反向散射通信系统的显著区别如下。

1) 未知的环境射频信号:环境激励信号可能由多个未知的信号混叠而成,而 RFID 系统的激励信号是已知的单音射频信号。

2) 环境射频信号不可控:环境激励信号来源未知,完全无法控制,而 RFID 系统的激励信号则具有很强的可控性。

3) 环境射频信号是调制信号:环境射频信号通常是调制信号,本身携带信息,而 RFID 系统的激励信号则可以不携带信息的载波信号。

4) 环境射频信号干扰:环境反向散射通信系统中,阅读器能同时接收来自电子标签的反射信号干扰和来自环境射频信号的干扰,由于不知道干扰信息,所以难以执行有效的干扰抑制或消除。而 RFID 系统中的干扰是已知的,相对容易处理。

由于上述差异性,传统 RFID 系统的传输方法和检测技术难以直接推广到环境散射通信系统中,因此,急需寻求新的检测理论和方法。

3 国内外研究现状

自从环境反向散射通信系统的概念问世以来,学术界研究人员在相关方向上开展了大量研究。前期的研究工作侧重于搭建原型系统进行可行性验

证和性能评估。参考文献[8]搭建了一个基本的环境反向散射通信验证系统,实现了两个无源电子标签之间的短距离通信,并有针对性地设计了数据分组格式和载波监听机制。在此基础上,参考文献[9]提出了在接收端配置两根天线,利用不同天线接收信号的差异性消除来自环境射频信号的干扰,原型系统验证结果显示,该方法能够有效提升系统数据率和通信距离。参考文献[10]利用反向散射通信技术实现了 LoRa 协议,并通过商用 LoRa 接收机以极低的能量消耗实现了超长距离通信。参考文献[11]和参考文献[12]则利用反向散射通信技术实现了 Wi-Fi 协议,并通过商用 Wi-Fi 接收机实现了高速通信。

为进一步提升环境反向散射通信系统的性能,学术界提出了一系列新的检测理论和传输方法。从经典的单天线环境反向散射通信系统模型出发,参考文献[13]建立了信号检测的基本理论模型,并在高斯环境信号假设下通过最大似然比推导获得了最佳的半相干检测器。在此基础上,为了避免对于信道状态信息的依赖,参考文献[14]引入了差分编码机制,并推导获得了非相干检测器。为了挖掘编码增益,参考文献[9]提出在电子标签中采用 FM0 编码,并设计了通过载波频偏来解调电子标签信息的检测器。参考文献[15]则提出了一种简单的信息编码方式,在电子标签中采用正/负相位和不反射 3 种反射状态,以提升系统的传输速率。由于环境射频信号的干扰,对于采用能量作为判断变量的一类检测器而言,其误码性能在高信噪比场景下存在误码平台。针对该问题,研究人员从挖掘环境射频信号特征、设计新型的电子标签调制方式和高效的检测算法等不同参考角度提出了干扰消除方法。针对正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 环境射频信号,参考文献[16]利用 OFDM 信号的循环序列特性,通过将不同循环前缀时间内的接收信号相减,巧妙地消除了环境射频信号的干扰。参考文献[17]则提出在电子标签中采用频率调制,并通过反向散射技术将反射信号搬移到和环境射频信号不重叠的频段,从而消除环境射频信号的干扰。最后,假设环境射频信号符号集和电子标签符号集已知,参考文献[18]提出了基于最大似然判别的联合检测方法,在解调环境射频信号的基础上,进一步解调电子标签符号,以消除环境射频信号的干扰。

在深入研究信号检测问题的同时,已经有不少

文献开始研究环境反向散射通信系统中的一些其他关键问题。针对环境反向散射通信系统中信道状态信息难以获取的特点,参考文献[19]提出了一种基于期望最大化算法的盲信道估计器。由于电子标签的工作状态依赖于能量收集的效率,参考文献[20]和参考文献[21]研究了能量和信息协同传输场景下最大化电子标签数据传输速率问题,参考文献[22]则考虑了不同接收器架构的影响,并证明了当射频发射器和接收机合并时,系统的吞吐量最大。此外,由于无线信号的空间传播特性,电子标签和阅读器之间的通信存在被监听的风险。鉴于此,参考文献[23]研究了环境反向散射通信系统中多个电子标签场景下的物理层安全问题,并设计了一种新的安全传输协议来改善系统的安全性能。

4 环境反向散射通信系统面临的挑战

从上述最新研究成果可知,关于环境反向散射通信系统的检测理论和传输方法虽然已经取得了一些进展,但相关研究正处于起步阶段,在信号检测方面依然存在着诸多关键问题亟待解决。

1) 检测时延: 能量检测器进行判决时需要将判决变量和某一特定的门限进行比较,而门限的估计依赖于相干时间内传输的所有符号,因此,判决必须在所有符号传输完成后才能开始,由此造成了一定的通信时延。

2) 等概输入假设: 大多数文献采用电子标签等概率发送“0”和“1”的假设,并在此基础上进行传输方案设计。而实际系统中,电子标签发送“0”和“1”的概率不一定相等,因此,基于等概假设而设计的方法在实际应用中会产生较大的性能损失。

3) 参数估计误差: 在解调过程中往往需要估计系统的某些参数,如噪声功率和信道增益等。在实际估计过程中,往往会引入估计误差,导致系统性能变差。

4) 误码平台: 对于阅读器而言,环境射频信号是干扰信号,当环境射频信号能量增强时,阅读器将面临更强的干扰,其有效信干噪比无法改善,导致能量检测器在高信噪比场景下出现误码平台现象。

除了面临在高可靠信号检测方面的诸多难点,环境反向散射通信系统在实际应用中也有很多关键问题亟待解决。

1) 系统吞吐率低: 受限于电子标签的成本和能耗,环境反向散射系统中电子标签的符号速率远低于

环境射频信号速率。同时,现有文献大多基于OOK调制模式,这意味着电子标签每次发送的符号只能携带1 bit信息,因此,系统的吞吐率难以提升。较低的传输速率极大地限制了电子标签的应用范围和场景,因此,如何采用更先进的模型、如何设计新型的电子标签调制方案和相应的检测器、如何提高系统吞吐率具有重要的实际价值。

2) 通信距离短: 由于路径损耗,当环境射频信号到达电子标签时,其信号强度一般较弱。如果电子标签和阅读器之间的距离较远,经过反射后到达阅读器的信号将更加微弱,这将给信号的可靠检测带来极大挑战。因此,如何设计新型的传输和接收解调方式以提升通信距离是一个具有重要意义的实际问题。

5 环境反向散射通信系统的解决方案

针对上述挑战和难点,本文将探讨一些潜在的解决思路。

1) 曼彻斯特编码

为了解决实际系统中电子标签发送符号不等概的问题,可以通过对基带信息进行曼彻斯特编码来实现。曼彻斯特码用一个周期的正负对称方波表示“0”,反向波形表示“1”,曼彻斯特编码如图4所示。每个码元的中心点都存在电平跳变,因此,不论原始符号序列中“0”和“1”如何分布,编码后的消息帧中“0”和“1”的数量相同。此外,对基带信息进行曼彻斯特编码带来了其他好处,如丰富的定时信息、自同步以及抗干扰等,同时有助于信息的高效传输。

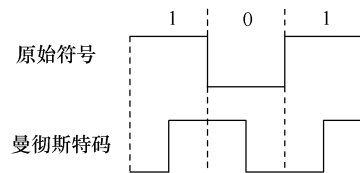


图4 曼彻斯特编码

由于曼彻斯特码的每个码元符号中间存在电平跳变,这也给符号检测带来了新思路。传统能量检测器的基本思路是将每个码元符号的能量和某个设定的门限进行比较。经过曼彻斯特编码后,只需要比较每个曼彻斯特码元符号前半部分和后半部分的相对能量大小。由于不需要设定判决门限,可以对每一个符号进行实时判决,因此,可以显著降低检测时延。未编码和曼彻斯特编码误码率

如图 5 所示。仿真结果显示，基于曼彻斯特编码的检测器^[24]性能优于参考文献[13]中的能量检测器性能。图 5 中图例 q 表示符号“1”的比例，可以看出，当发送符号“0”和“1”不等概时，参考文献[13]中的能量检测器误码率显著上升，而曼彻斯特检测器性能表现出了很好的顽健性。

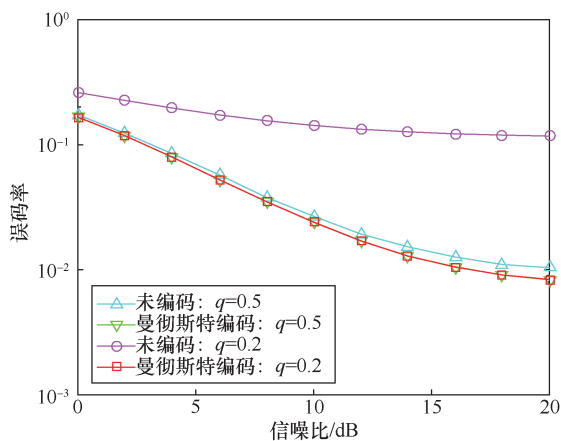


图 5 未编码和曼彻斯特编码误码率

2) 特征值检测

基于信号能量的检测器在判决时一般都需要知道噪声功率信息。在实际系统中，噪声功率信息可以通过估计获得，为避免估计噪声功率不确定性带来的系统性能损失，可以借鉴认知无线电系统频谱感知中的特征值检测方法。其基本思想是利用接收信号协方差矩阵最大和最小特征值之间的关系，判断信号是否存在。

对于环境反向散射通信系统来说，由于环境射频信号的干扰，接收信号协方差矩阵和频谱感知场景不同，不能通过简单地比较特征值的相对大小来检测电子标签的反射状态，因此，需要重新设计相应的特征值相关检测器。鉴于此，在假设部分信息未知的情况下，通过广义似然比判别准则，可以获得环境反向散射通信系统下的特征值检测器。特征值检测和能量检测误码率如图 6 所示，仿真结果显示，与假设理想噪声功率信息的能量检测器相比，特征值检测器能够得到更好的误码性能。由此可以进一步推测，当实际场景中存在噪声估计误差时，特征值检测器将明显优于能量检测器。

3) 多进制调制

为了提高电子标签的传输速率，一种比较直观的思路是对电子标签采用多进制调制，如多进制相位键控 (MPSK) 和多进制频率键控 (MFSK) 等

方式。由于电子标签必须满足低成本和低功耗的要求，如何在电子标签端实现产生多进制调制是关键所在。基于现有文献，MPSK 调制可以通过对电子标签采用 M 种匹配状态来实现不同相位的信号反射；而 MFSK 调制相对复杂，可以通过对占空比为 50% 的方波进行傅里叶分解，结合低通滤波得到相应频率的正弦信号。

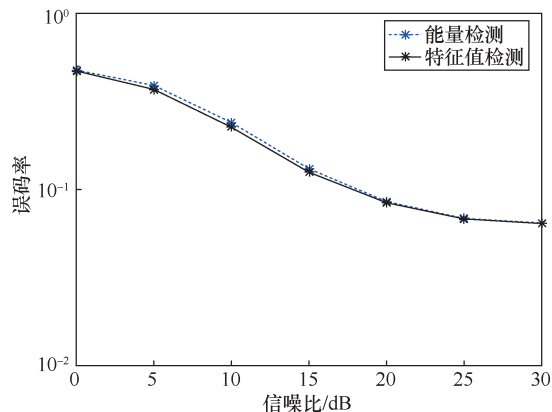


图 6 特征值检测和能量检测误码率

对于 MPSK 调制，其解调过程与 OOK 系统类似，可以通过匹配接收信号的能量区间来判断发送信息，因此，在高信噪比下同样存在误码平台；而对于 MFSK 调制，可以巧妙地设计搬移频率，使反射信号和直射环境射频信号的频谱不重叠，频谱搬移如图 7 所示。在此基础上，通过滤波器可以将直射环境射频信号滤除，从而消除干扰的影响。

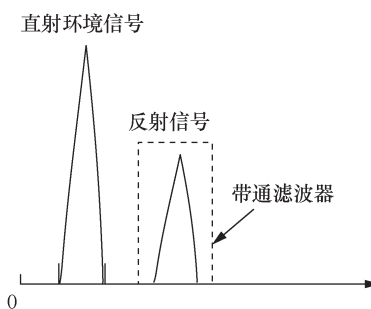


图 7 频谱搬移

2FSK 和 OOK 的误码率性能^[25]如图 8 所示，仿真结果显示，在没有消除干扰的情况下，2FSK 调制的误码率性能优于 OOK 调制的误码率性能。在滤除环境射频信号干扰后，2FSK 检测的误码平台消失，极大地改善了系统的误码率性能。

4) 多天线接收技术

多天线技术能够深度挖掘空间维度资源，提供

阵列增益、复用增益和分集增益, 并具有较强的干扰抑制功能, 已成为下一代无线通信系统的核心技术。若环境反向散射通信系统中阅读器接收的反射信号强度弱, 则需要阅读器中配置多天线, 并利用适当的方法处理接收的多个信号, 将有助于增强接收信号强度, 进而改善系统的误码率和吞吐率, 是一种非常有效的方案。

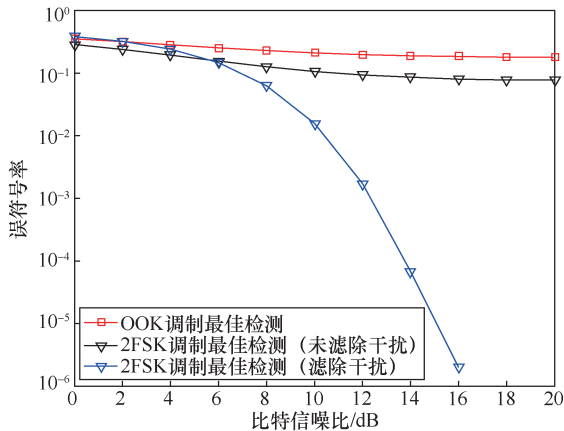


图8 2FSK 和 OOK 的误码率性能

当阅读器具有多天线时, 高斯环境信号假设下, 能量检测器不再最佳。鉴于此, 参考文献[26]基于后验概率最大化准则, 推导获得了多天线接收场景下的最佳检测器。最佳检测和能量检测误码率如图9所示, 能量检测器在高信噪比条件下会出现误码平台, 而最佳检测器则没有误码平台, 其误码率性能显著优于能量检测器。此外, 由于接收能量的大幅度提升, 电子标签和阅读器之间的通信距离也大幅度增加。

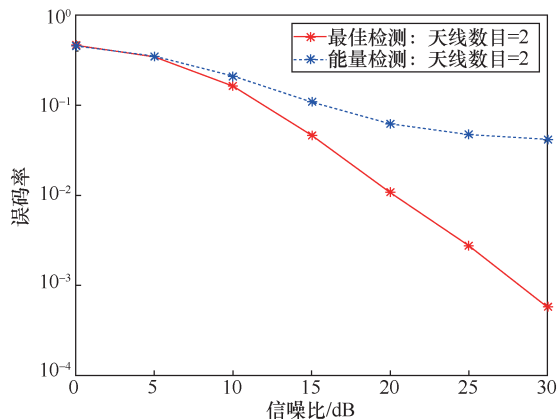


图9 最佳检测和能量检测误码率

6 展望

目前, 环境反向散射通信系统的研究尚处于起

步阶段, 除了文中涉及的部分研究内容, 还有诸多方面值得进一步深入挖掘。

1) 超宽带环境反向散射通信: 环境射频信号具有时域高度动态变化、空域覆盖不规则和频域带宽不均衡的特点, 在特定的时间和地点, 可能存在环境激励信号不可用的情况。超宽带反向散射通信允许超宽频域范围内的信号作为激励信号, 能够有效拓宽环境反向散射通信的应用范围。但是如何研发具备发射超宽带信号的低成本电子标签、如何设计适用于超宽带环境信号的传输方法和检测技术是急需解决的首要问题。

2) 多电子标签接入: 多电子标签接入是实际应用中非常重要的需求, 目前鲜有文献涉及该问题。虽然可以采用传统无线通信系统中心式的正交接入机制如时分多址等, 但是由于反向散射通信符号率低, 当节点过多时会造成较长的时延。因此, 设计恰当的非正交接入机制以及相应的混叠信号分离和检测算法具有重要的实际意义。

3) 混合通信系统: 环境反向散射通信技术的主要特征是低成本、低功耗和低速率, 可以和传统通信技术有机结合。如当节点需要高速数据传输时, 可以采用传统通信技术; 当节点仅需要低速数据传输时, 可以采用环境反向散射通信技术, 由此节省节点的能量。要实现一个高效的混合通信系统, 需要解决协议设计、速率适配、功率控制等一系列问题。

7 结束语

无源物联网解决了传统物联网后期维护成本高的问题, 理论上具有无限长的网络寿命, 正成为当前物联网领域的研究热点。环境反向散射通信技术是拓展无源物联网应用范围的关键使能技术之一。由于环境射频信号的未知性和不可控性, 环境反向散射通信技术面临着信号检测时延长、误码率高、传输速率低和通信距离小等诸多关键挑战。信息编码、特征值检测、高阶调制和多天线接收等一系列技术为解决环境反向散射通信系统面临的问题提供了有效途径, 将进一步推动和促进无源物联网的快速发展。

参考文献:

- [1] ATZORI L, IERA A, MORABITO G. The Internet of things: a survey[J]. Computer Networks, 2010, 54(15): 2787-2805.
- [2] LI S, LI D X, ZHAO S. The Internet of things: a survey[J]. Infor-

- mation Systems Frontiers, 2015, 17(2): 243-259.
- [3] 田野, 刘佳, 申杰. 物联网标识技术发展与趋势[J]. 物联网学报, 2018, 5(2): 12-21.
TIAN Y, LIU J, SHEN J. Development and trend of IoT identifier technology[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2018, 5(2): 12-21.
- [4] 朱剑驰, 杨蓓, 陈鹏, 等. 物联网无线接入技术研究[J]. 物联网学报, 2018, 2(2): 77-88.
ZHU J C, YANG B, CHEN P, et al. Research on wireless access technologies for Internet of things[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2018, 2(2): 77-88.
- [5] 王公仆, 熊轲, 刘铭, 等. 反向散射通信技术与物联网[J]. 物联网学报, 2017, 1(1): 67-75.
WANG G P, XIONG K, LIU M, et al. Backscatter communication technology and Internet of things[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2017, 1(1): 67-75.
- [6] STOCKMAN H. Communication by means of reflected power[J]. IRE, 1948, 36(10): 1196-1204.
- [7] KIMIONIS J, BLETAS A, SAHALOS J. Increased range bistatic scatter radio[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 62(3): 1091-1104.
- [8] LIU V, PARKS A, TALLA V, et al. Ambient backscatter: wireless communication out of thin air[C]//ACM SIGCOMM'13. ACM, 2013: 39-50.
- [9] PARKS A, LIU A, GOLLAKOTA S, et al. Turbocharging ambient backscatter communication[C]//ACM SIGCOMM. ACM, 2014: 17-22.
- [10] TALLA V, HESSAR M, KELLOGG B, et al. LoRa backscatter: enabling the vision of ubiquitous connectivity[J]. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2017, 1(3): 1-24.
- [11] BHARADIA D, JOSHI K, KOTARU M, et al. BackFi: high throughput Wi-Fi backscatter[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2015, 45(5): 283-296.
- [12] ZHANG P, BHARADIA D, JOSHI K, et al. HitchHike: practical backscatter using commodity Wi-Fi[C]//ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems CD-ROM. ACM, 2016: 259-272.
- [13] QIAN J, GAO F, WANG G, et al. Symbol detection and performance analysis of the ambient backscatter system[C]//IEEE/CIC International Conference on Communications in China. IEEE, 2016: 1-6.
- [14] QIAN J, GAO F, WANG G, et al. Noncoherent detections for ambient backscatter system[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(3): 1412-1422.
- [15] LIU Y, WANG G, DOU Z, et al. Coding and detection schemes for ambient backscatter communication systems[J]. IEEE Access, 2017, 5: 4947-4953.
- [16] YANG G, LIANG Y C, ZHANG R, et al. Modulation in the air: backscatter communication over ambient OFDM carrier[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 66(3): 1219-1233.
- [17] ZHANG P, ROSTAMI M, HU P, et al. Enabling practical backscatter communication for on-body sensors[C]//ACM SIGCOMM. ACM, 2016: 370-383.
- [18] YANG G, ZHANG Q, LIANG Y. Cooperative ambient backscatter communications for green Internet-of-things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2): 1116-1130.
- [19] MA S, WANG G, FAN R, et al. Blind channel estimation for ambient backscatter communication systems[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 2(6): 1296-1299.
- [20] THAI H, NIYAYO D, WANG P, et al. Ambient backscatter: a new approach to improve network performance for RF-powered cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(9): 3659-3674.
- [21] LYU B, YANG Z, GUI G, et al. Wireless powered communication networks assisted by backscatter communication[J]. IEEE Access, 2017, 5: 7254-7262.
- [22] DARSENA D, GELLI G, VERDE F. Modeling and performance analysis of wireless networks with ambient backscatter devices[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(4): 1797-1814.
- [23] JIA Y, WANG G, ZHONG Z. Physical layer security-enhancing transmission protocol against eavesdropping for ambient backscatter communication system[C]//International Conference on Wireless, Mobile and Multi-Media. IEEE, 2016: 43-47.
- [24] TAO Q, ZHONG C, LIN H, et al. Symbol detection of ambient backscatter systems with Manchester coding[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018(17): 4028-4038.
- [25] TAO Q, ZHONG C, HUANG K, et al. Ambient backscatter communication systems using MFSK modulation[C]//IEEE/CIC International Conference on Communications in China. IEEE, 2018: 358-363.
- [26] TAO Q, ZHONG C, CHEN X, et al. Ambient backscatter communication systems with multi-antenna reader[C]//Asia-Pacific Conference on Communications. IEEE, 2018: 245-250.

[作者简介]



陶琴(1995-),女,江西南昌人,浙江大学信息与电子工程学院博士生,主要研究方向为面向未来物联网的反向散射技术等。



钟财军(1982-),男,浙江诸暨人,博士,浙江大学信息与电子工程学院教授,主要研究方向为下一代无线通信系统基础理论与关键技术。



张朝阳(1973-),男,湖北蕲春县人,博士,浙江大学信息与电子工程学院教授,主要研究方向为新一代无线通信与智能网络、网络信息论与新型编译码以及感知—通信—计算协同融合。