

使用编码的反向散射通信协议设计与性能分析

何 昕^{1,2} 吴 帆¹ 祝玉军¹ 许 勇¹ 杨盘隆^{2,3}

¹(安徽师范大学计算机与信息学院 安徽芜湖 241002)

²(南京信息工程大学计算机学院 南京 210044)

³(中国科学技术大学计算机科学与技术学院 合肥 230026)

(xin.he@ahnu.edu.cn)

Protocol Design and Performance Analysis of Backscatter Communications Using Codes

He Xin^{1,2}, Wu Fan¹, Zhu Yujun¹, Xu Yong¹, and Yang Panlong^{2,3}

¹(School of Computer and Information, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241002)

²(School of Computer Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

³(School of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract The increasing number of the Internet of things (IoT) devices in our environment presents significant opportunities as well as challenges, including limited battery life, low computing power, and scalability for multiple access. Recent advances in backscatter communication have enabled ubiquitous IoT devices to communicate in an energy-effective manner. However, a fundamental challenge in backscatter communication is to design a multiple access protocol to support concurrent communications from numerous tags. Aiming at tackling the high bit error rate and low transmission rate of large-scale tag concurrent communication, we design a coding-based code division multiple access technique to facilitate multi-tag backscattering with reliable communication. Firstly, the chip discrimination tags with strong orthogonality such as Walsh code are combined with error correction coding to enhance the anti-interference ability. Secondly, the joint decoding of correlation detection and decoding is used to reduce the bit error rate and realize the reliable communication from the backscatter link. Finally, a grouping algorithm is designed to cluster tags based on the K -means clustering algorithm, which fully utilizes the time-code resources and enhances the capacity. Experimental results demonstrate that our scheme can achieve reliable communication with 100+ tags, with a bit error rate of approximately 2%, and the achieved throughput of 39 Mbps.

Key words backscatter communication; multi-tag; CDMA; grouping algorithm; performance evaluation

摘 要 周围环境中不断增加的物联网设备带来了巨大的机遇,但也带来了挑战,包括有限的电池寿命、低计算能力和多址接入的可扩展性。反向散射通信使得无处不在的物联网设备能够以超低功耗的方式进行通信,然而,支持大规模并发通信也是反向散射通信需要研究的问题之一。针对大规模标签并发通信误码率(BER)较高、传输速率低等问题,设计基于编码的码分多址(CDMA)接入技术,以支持多标签反向散射并发可靠通信。首先,该系统利用沃尔什(Walsh)码等正交性较强的码片区分标签并结合纠错编码,以增强抗干扰能力;其次利用相关检测与译码联合解码以降低误码率,实现信道的可靠通信;最后,在此基础上,基于 K 均值聚类算法(K -means clustering algorithm)设计标签分组机制,充分利用时-码2维资源扩充容量。实验表明,该方案能够实现100+个标签的可靠通信,误码率约2%、吞吐量达到了39 Mbps。

收稿日期: 2023-01-03; 修回日期: 2024-05-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB2100302); 国家自然科学基金项目(62072004, 61702011)

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFB2100302) and the National Natural Science Foundation of China (62072004, 61702011).

关键词 反向散射通信; 多标签; 码分多址接入; 分组算法; 性能评价

中图法分类号 TP393.04

虽然传统的 802.11 Wi-Fi 网络在为单个设备提供越来越高的传输速率方面取得了巨大成功,但最近越来越多的物联网设备的趋势为未来的网络范式设计带来了新的要求和挑战.根据 IoT Analytics 公司的调研报告^[1],2022 年全球物联网连接数量增长了 18%,达到 143 亿活跃物联网节点,而这一数量将在 2023 年达到 167 亿,增长了 16%.这些大量的设备将被部署在我们周围,甚至我们的身体上,以提供各种类型的传感信息来改善我们的生活质量.与传统的高性能终端,如笔记本电脑、智能手机等需要高传输速率不同的是,物联网设备通常以低速率或突发方式传输数据.除此之外,物联网设备体积受限,可安装的电池通常容量很小,因此,这些没有电源插头的物联网设备的电量资源很少.在过去的几年里,反向散射通信由于其低功耗和易于部署的特性成为部署物联网的极佳解决方案.

作为一种超低功耗通信技术,反向散射通信近来备受关注^[2-6].文献[3]提出了多重散射,首次展示了反向散射标签可以以超低功耗方式识别各种激励信号.FreeRider^[4]系统实现与多种商用无线电,如 802.11 g/n Wi-Fi、ZigBee 和蓝牙进行反向散射通信,而这些无线电同时可用于传统数据通信.无源 Wi-Fi 证明标签可以生成 802.11 b 反向散射数据包^[7].文献[8]提出了一种与商用蓝牙低功耗(blueetooth low energy, BLE)器件完全兼容的 BLE 反向散射通信系统,并使用各种商用 BLE 器件和带有 FPGA 的定制标签来搭建原型系统.文献[9]介绍了一种 Wi-Fi 反向散射通信系统 MOXcatter.在该系统中,反向散射标签可以将其感测数据嵌入到周围的空间流包中,并且感测数据和原始包都可以被商用 Wi-Fi 设备解码.在广泛部署的无线通信技术如 Wi-Fi、蓝牙的推动下,反向散射通信逐渐发展成熟,但也存在一些挑战.文献[10]使用 Wi-Fi 数据包的剩余信道信息实现每个符号的带内反向散射,克服了现有反向散射技术以及其他类型的 802.11 设备只支持单个包反向散射而导致性能不佳的问题.Wi-Fi 反向散射^[11]为了展示 Wi-Fi 反向散射的可行性,构建了一个硬件原型,并演示了射频供电设备和商用 Wi-Fi 设备之间的第 1 条通信链路.文献[12]提出了一种最佳时间分配方案,该方案考虑了自适应反向散射系数和中继选择,以最大限度地提高吞吐量.文献[13]提出了一种新型反射通

信系统的设计,使 2 个设备能够借助环境射频进行通信.该方法利用现有的电视和蜂窝传输来消除对电线和电池的需求,从而实现无处不在的通信.

反向散射技术使得物联网低功率需求基本上得到满足.不过,现有的工作主要集中在单个节点(标签)场景,亦或是设计不同激励源场景下的反射通信机制.然而,大规模反射通信的接入技术是成功部署基于反射通信物联网系统的关键,例如智能家居、智慧医疗等.因此,大规模标签并发反射通信是当前亟需解决的问题,目前一些工作已经开始了新的探索.文献[14]提出一种多标签无线供电反向散射通信网络能效最大化资源分配算法,建立了基于系统能效最大化的资源分配模型,实现了较好的能效以及收敛性.通过这样的研究工作,可以改善多标签反射通信的能效和资源利用效率,进一步推动基于反向散射的物联网系统的部署,这对于实现智能家居等大规模应用场景中的高效通信至关重要.然而,仍需要进一步的研究和探索,以解决大规模标签并发反射通信所面临的挑战,实现更高的性能和可扩展性.

本文设计的 CBMA+系统是对码分多址(code division multiple access, CDMA)^[15]的扩展.相较于 CBMA 系统,CBMA+在多个层面进行了改进和增强.在原型系统方面,CBMA+优化原型系统设计,设计功率控制算法,实现了实际场景下的 10 个标签的并发通信;在物理层上,CBMA+引入了信道编码技术,通过仿真实现了对 100 个标签的大规模反射通信的模拟;在链路层,通过功率进行分组,进一步优化性能.基于实验,CBMA+实现了可观的误码率(bit error rate, BER)和吞吐量,吞吐量提高到 CBMA 的 5 倍,同时保持较低误码率.结果表明 CBMA+在处理大规模标签并发通信时具备良好的性能和可靠性.

本文的主要贡献包括 2 个方面:

- 1) 基于编码机制,设计多反射标签的并发通信接入协议,并利用原型系统与仿真进行性能评价.
- 2) 设计标签分组算法,利用时-码多维度资源,一方面降低误码率,另一方面增加容量.

1 相关工作

近年来,研究者对反向散射通信技术进行了广泛的研究.从系统结构的角度来看,可以将反向散射

通信系统分为3种不同类型^[16].第1种是收发一体反向散射通信系统,类似于常见的RFID系统^[17],其中射频源和反向散射接收器位于同一设备上.然而,这项技术在读取器向标签进行发射信号和接收信号的过程中,会存在往返路径损耗.这种反向散射通信方式的有效通信距离短,主要用于短距离的射频识别应用.第2种是收发分离反向散射通信系统^[18],它由反向散射发射器、反向散射接收器和载波发射器组成.与传统的无线通信系统相比,该系统具有更低的功耗,这是由于反向散射发射机不需要产生有源射频信号,但是,该系统需要部署固定的载波发生器.因此为消除对专用有源射频源的依赖,华盛顿大学于2013年提出了第3种类型即环境反向散射技术^[13],利用环境中已有的电视广播信号作为射频源,而不需要额外的有源设备.环境反向散射技术的出现极大地简化了大规模物联网系统的部署,同时进一步降低了功耗和成本,为反向散射通信技术的发展带来了显著推动.近年来,研究者们将环境反向散射通信扩展至Wi-Fi^[19]、LoRa^[20]和蓝牙^[21]等.

而随着物联网规模的扩大和一些场景的实际需要,研究者开始着力解决大规模反向散射标签的远距离与并发通信问题.近年来的一些反向散射系统总结对比如表1所示.LoRa BackScatter^[22]成功地从相距475 m的射频源和接收器之间的任何位置进行通信,并兼容商用LoRa硬件.而当其反向散射设备与射频源位于同一位置时,接收器可以远至2.8 km之外.PLoRa^[23]是一种环境反向散射设计,可以为无电池物联网设备提供远距离数据传输服务.ALoba^[24]以环境LoRa为激励,并搭载带内OOK调制信号的数据,实现低功耗的39.5~199.4 Kbps传输速率,比PLoRa^[23]高10.4~52.4倍.P²LoRa^[25]是一个具有并行解码和远距离通信的环境LoRa后向散射系统.为实现长距离

通信,通过在频域和时域集中泄漏能量来提高后向散射信号的信噪比,实现了2.2 km的长距离通信,并支持多个并行标签传输.文献[26]提出了一种新的用于反向散射网络的无线协议NetScatter,该协议可以扩展到数百个标签的并发传输,通过引入分布式啁啾扩频编码,在频率域对标签进行区分.文献[27]基于OFDMA后向散射实现标签的并发通信,该系统将标签在子载波上对齐区分,可实现48个标签的并发通信.

然而现有反向散射系统各自也具有一定的局限性,具体表现在2个方面.首先,在并行解码(多址接入)方面有一定的欠缺.LoRa BackScatter^[22], PLoRa^[23], ALoba^[24]仅仅适用于单个节点或较少标签并行解码的场景,其中,ALoba增加到5个标签时,误码率增长到0.3左右.其次,未考虑高数据速率的传输需求.高数据速率的反向散射通信可以支持更高的吞吐量,使大规模数据的传输变得更加高效.NetScatter^[26]虽然实现了超过100个标签的通信,但是只能部署大量数据速率有限且通信范围较短的标签.基于LoRa激励的3种代表系统LoRa BackScatter^[22], PLoRa^[23], P²LoRa^[25]虽然实现了远距离反向散射通信,但是数据速率较低.OFDMA后向散射^[27]主要用于多个定位,注重并行性、低功耗和准确性.综上,现有的后向散射系统较少同时考虑多址接入和高容量2个问题.为此,我们的CBMA+方案着眼于这2个问题,达到了1 Mbps的数据速率和100个标签39 Mbps的总吞吐量,并确保较低的误码率.同时,CBMA+具有灵活编码的特性,后续可以考虑引入ACC编码^[28]来进一步降低误码率,提高性能.

本文为实现物联网大规模设备的高效率和可扩展的反向散射通信,需解决2个问题:首先是容量方面.由于设备数量巨大,反向散射通信应该不仅向单个节点,而应尽可能向更多节点同时提供高容量通信,即需要设计适当的多址接入方案.其次是控制方面.当节点数量呈指数增长时,集中控制很难实施,因此反向散射通信应该以分布式方式进行,以提高可扩展性.

为实现高容量并发通信,本文基于码分多址方案,即通过不同的码片来区分标签,实现不同标签同频同时地并发通信.与频分多址和时分多址相比较,码分多址接入多址能力强、抗干扰性好,并且有更大的系统容量.但是,码分多址性能受码片正交性的影响,例如,码片不同的时延,可能会使性能快速下降.但在反向散射通信中,标签传输信息需要由激励源

Table 1 Summary of Existing BackScattering Systems in Recent Years

表1 近年现有反向散射系统的总结

方案	数据速率/Kbps	标签数量	误码率	总吞吐量/Kbps
LoRa BackScatter ^[22]	≤37.5	1	—	—
PLoRa ^[23]	6.25	1	≤0.01	—
ALoba ^[24]	≤199.4	≤5	≤0.3	200
P ² LoRa ^[25]	—	≥100	≤0.001	11.27
NetScatter ^[26]	500	≥100	≤0.000 5	—
OFDMA ^[27]	—	≤50	—	—
CBMA+	1 000	≥100	≤0.025	39 000

注:“—”表示参考文献中未提及.

激励,这使得分布式同步变为可能,为码分多址的接入技术部署提供了天然便利。

本文提出 CBMA+方案,并通过仿真与实际原型系统实验验证其性能。CBMA+利用直接序列扩频(direct sequence spread spectrum, DSSS)技术来实现反向散射通信,每个标签被分配不同的码片,标签传输信息时将信息编码为码片序列再进行反射传输。DSSS具有很强的抗衰落能力,且支持多标签的并发通信。然而,为了在反向散射中实现 CBMA+方案,我们面临 2 个主要挑战:

1) 异步信号。与 RFID 系统不同,反向散射系统中的标签通常以分布式方式工作,即,难以通过发送控制信号来协调所有标签,这导致从标签接收的信号不同步。异步问题严重影响了扩展序列的正交性,因此传统的方法不适于分离信号。

2) 不同的接收功率。反向散射信号的强度本质上很弱,并且主要受标签和接收器之间距离的影响。因此,由于 CDMA 系统中众所周知的远近问题^[29],接收信号强度在标签之间变化,从而导致显著的性能下降。使问题变得更具挑战性的是,由于标签本身不直接产生射频(radio frequency, RF)信号,因此标签处的功率控制相当困难。

为了解决这 2 个问题,我们在 CBMA+的框架下提出了 2 个方案:1)基于相关性的检测器;2)标签分组算法。

基于相关性的检测器的目的是减少由异步问题引起的负面影响,而标签分组方案旨在利用多维度资源,从时-码 2 个维度降低反向散射通信中标签之间的显著功率差异来提高性能,从而进一步扩容。此外,我们可以结合 CBMA+总的阻抗调节来进行功率控制,提升分组算法的自由度。本文着重分析相关性检测以及标签分组算法的性能。总之,本文设计的 CBMA+系统展示了 3 点有利的特性:

1) 稳定的传输。由于反向散射信号的强度较弱,鲁棒性是多址系统需要具备的最重要的特征之一。

2) 高效率。计算域和通信域的开销都很小,标签只需要执行“与”操作来扩展它的信号。

3) 灵活的编码。利用扩频码与信道纠错码的组合,用户可权衡可靠性与复杂度,灵活选择编码。

2 系统模型

本节介绍系统模型以及其核心算法。CBMA+系统框架如图 1 所示,该框架是由标签端和接收端 2

部分组成,由于激励源可以采用一般的软件无线电设备,例如 USRP 等,因此我们在系统中未特别提及。标签端首先随机生成待传输的消息,然后进行信道编码,再利用扩频码产生码片,最后将扩频后的信息控制天线阻抗以进行二进制开关调制。而接收端对所有标签的信息进行并行解码,即解调后利用码片进行解扩、解编码,最后进行硬判决,恢复标签的信息。

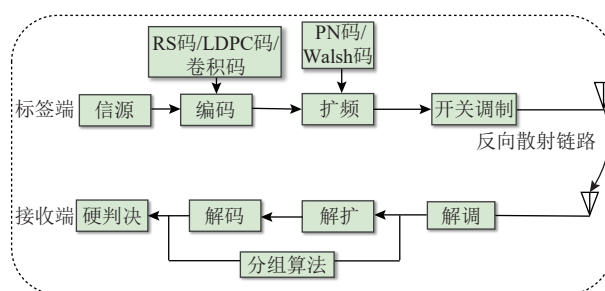


Fig. 1 System framework of CBMA+

图 1 CBMA+系统框架

2.1 发送端

在发送端我们首先将源信息进行编码,使用纠错能力比较强的编码方式进行性能比较,通过实验仿真证明卷积编码在多标签反向散射通信中效果最佳。然后将编码后的序列扩展为更高速率的码片序列,即采用扩频技术将编码序列中“1”转换为分配的码片序列,“0”转为码片序列的反码。最后,该扩频序列控制射频天线的开关,调节阻抗以进行二进制开关调制,即“1”反射信息、“0”不反射。

2.2 接收端

接收端接收到信号后,会进行相应的解调、解扩、解编码,恢复原信号。本文采用分组解码的方式,其目的是减少其他标签对解标签产生的干扰,获得更小的误码率,从而实现信道的可靠通信。

1) 解调解扩

接收端接收到信号之后,首先计算接收到的信号序列与扩频序列之间的相关系数,该相关系数代表了接收到的信号序列与扩频序列之间的相关程度,可以用“+1”与“-1”表示,“+1”表示呈正相关,“-1”表示呈负相关,“0”表示不相关。由于 CBMA+是 100 个标签的反射通信,使用循环操作来计算每一个标签的相关系数,如果与表示“1”的 Walsh 码的相关性高于与表示“0”的 Walsh 码的相关性,则码片被解码为“1”,反之亦然。

2) 译码

解调之后,为了获得更准确的信息,本文采用维特比(Viterbi)译码的方式来寻找最大似然比,它是一

种概率译码, 通过寻找一条路径, 使该路径的累计量度最大. 由于量度能够衡量所需幸存路径编成的码字和接收序列的相似度, 所以我们寻找量度越大, 幸存路径是信息序列的概率就越大, 该译码方式选取量度最大的幸存路径作为译码结果. 本文利用这一译码方式来降低误码率, 从而获得更准确的解码结果.

Viterbi 算法是针对卷积编码器中的网格结构的一种译码算法, 本文中用的卷积码编码器长度是 3, 约束长度为 4, 而一般 Viterbi 算法约束长度小于 10 的时候, 能获得高效的信道编码.

2.3 算法设计

为了进一步降低并发带来的干扰以及扩充容量, 本文采用了分组算法实现时-码 2 维的多址接入, 即组间时分、组内码分. 首先使用 K 均值聚类算法将 100 个标签分成 4 组 (考虑标签被分布在一个 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的空旷区域), 如图 2 所示. 该算法是基于距离来进行分组, 采用距离作为相似性的指标, 考虑 2 个标签越相近它们的相似性会越大, 因此每组是由靠得相近且独立的标签构成. 假设这里的 100 个标签表示为 $B = \{B_1, B_2, \dots, B_{100}\}$, 由于分为 4 个组, 所以需要 4 个聚类中心 D_1, D_2, D_3, D_4 , 然后计算每个标签到聚类中心的欧氏距离, 如式 (1) 所示, 类簇中心的计算如式 (2) 所示, 其中 B_i 表示第 i 个标签, D_j 表示第 j 个聚类中心, B_{it} 表示第 i 个标签的第 t 个属性, D_{jt} 表示第 j 个聚类中心的第 t 个属性, $|S_l|$ 表示第 l 组中标签的个数.

$$\text{dis}(B_i, D_j) = \sqrt{\sum_{t=1}^o (B_{it} - D_{jt})^2}, \quad (1)$$

$$D_j = \frac{1}{|S_l|} \sum_{B_i \in S_l} B_i. \quad (2)$$

完成分组后, 分别记录每组中对应的标签, 通过 Viterbi 和分组相结合解码的思想进行译码, 假定信

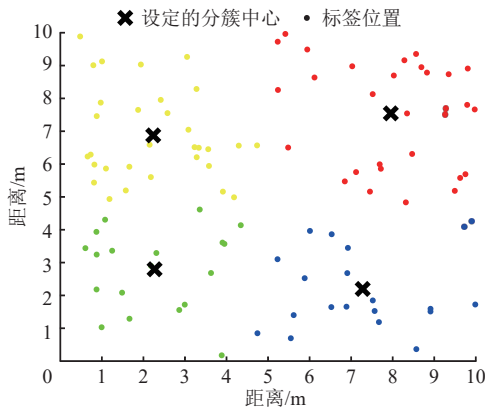


Fig. 2 Tag grouping

图 2 标签分组

息序列长度为 h , 在编码器 (n, k, m) 中, n 是码长, k 是信息元, m 是编码寄存器的长度, $L = m + 1$ 是编码的约束长度. 假设长度 $K = kh$ 的信息序列 $c = (c_0, c_1, \dots, c_{h-1})$, 被编码成长度为 $N = n(m + h)$ 的码字 $e = (e_0, e_1, \dots, e_{h+m-1})$, 在经过二进制输入和 Q -ary 输出的离散无记忆信道输出得到输出序列 $r = (r_0, r_1, \dots, r_{h+m-1})$, 译码器对接收到的序列进行处理, 得到 e 的估计 \hat{e} , 在离散无记忆信道情况下, 最大似然译码器按照最大化对数似然函数 $\ln P(r|e)$ 作为选择 \hat{e} 的准则, 所以对于离散无记忆信道,

$$P(r|e) = \prod_{l=0}^{h+m-1} P(r_l|e_l) = \prod_{l=0}^{N-1} P(r_l|e_l). \quad (3)$$

式 (3) 两边取对数后为

$$\ln P(r|e) = \sum_{l=0}^{h+m-1} \ln P(r_l|e_l) = \sum_{l=0}^{N-1} \ln P(r_l|e_l), \quad (4)$$

其中 $P(r_l|e_l)$ 是信道转移概率, 当所有码字等概率时, 这个是最小错误概率译码准则. 这种分组与 Viterbi 结合的译码方式可以相对减少其他标签在译码过程中的干扰, 从而降低误码率.

3 性能分析

3.1 原型系统测试

反向散射系统由 1 个激励源、 N 个标签和 1 个接收器组成. 激励源发出单频的音调或其他信号 (如 Wi-Fi、蓝牙) 作为激励信号, 在反向散射系统中充当电源的角色. 每个标签使用与其他标签不同的扩频码来扩展其信息, 并通过反射和调制激励信号来传送扩展的信息, 然后, 接收器执行一系列操作来解码接收到的信号. 我们对 CBMA+ 系统中检测模块的性能进行评估. 如图 3 所示, 我们制作了 10 个标签原型系统用于反向散射数据, 激励源采用 USRP N210、接收

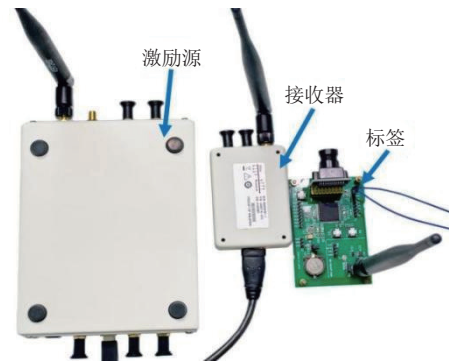


Fig. 3 Prototype system in actual test

图 3 实际测试的原型系统

器使用 USRP B205 以进行实际测试. 在测试中, 激励源持续发送 2 GHz 的单音信号, 其功率为 20 dBm. 为了进一步了解一些实际因素对我们的系统性能的影响, 我们进行了以下实验.

1) 首先研究标签和接收器之间距离的影响. 为此, 我们将比特率设置为 1 Mbps, 并将距离从 50 cm 更改为 400 cm, 标签数量为 2, 3, 4 的吞吐量结果如图 4 所示. 当距离小于 2 m 时, 吞吐量稳定地保持在某一水平, 如果距离超过 2 m, 吞吐量会随着距离的增加而略有下降. 其原因是反向散射链路的接收功率几乎下降到噪声水平, 成功解码具有一定的困难. 由于实验场景的限制, 我们只测试了 4 m 的最大距离, 虽然吞吐量性能不如距离小于 2 m 时的情况, 但仍维持在相对较好的水平.

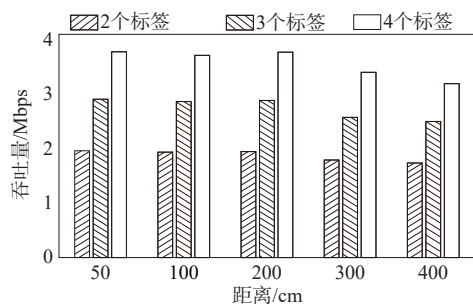


Fig. 4 Throughput under different distance

图 4 不同距离下的吞吐量

2) 为了评估不同标签下 CBMA+ 系统的吞吐量, 放置了 1 个激励源、1 组标签和 1 个接收器, 做了一系列实验计算 2, 4, 6, 8, 10 个标签下的吞吐量, 标签的比特率设置为 1 Mbps, 标签与接收机之间的距离为 2 m. 如图 5 所示, 随着标签数量的增加, 接收到的吞吐量呈线性增加. 当标签数量为 10 时, 吞吐量能达到 8 Mbps.

3) 在图 6 中, 我们比较了 BiGroup^[30], FlipTracer^[31], CBMA+ 在 5 个标签并发通信下的吞吐量. 由于 FlipTracer, BiGroup 的吞吐量分别在发送速率为 500 Kbps

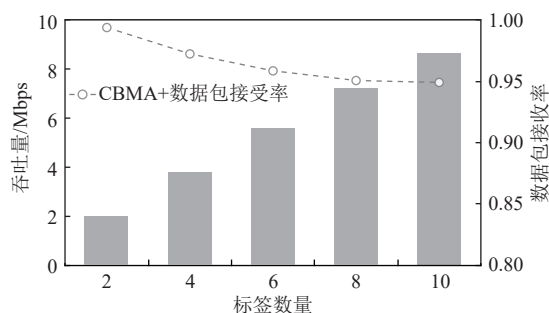


Fig. 5 Throughput with different numbers of tags

图 5 不同标签数量的吞吐量

和 200 Kbps 时达到最大值, 所以我们只展示它们在发送速率为 1 Mbps 以下的吞吐量. 可以看到, 在所有情况下, CBMA+ 的吞吐量非常接近最大可能吞吐量. 且 CBMA+ 的吞吐量增加是显著的; 在发送速率为 250 Kbps 的情况下, CBMA+ 比 FlipTracer 的吞吐量提升 1.1 倍, 相较 BiGroup 提升 4 倍. 此外, CBMA+ 可以支持超过 1 Mbps 的比特率, 在这种情况下, 吞吐量高达 4.7 Mbps.

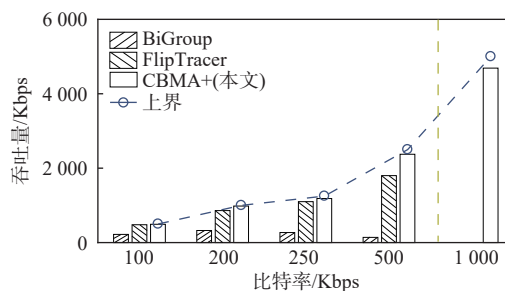


Fig. 6 Throughput performance compared with other techniques

图 6 与其他技术的吞吐量性能比较

4) 为了评估 CBMA+ 的抗干扰能力, 我们比较了在不同工作环境下 CBMA+ 的数据包接收速率: ①工作在无干扰通道 (实验中选择了 2 GHz 频段); ②有 Wi-Fi 信号的环境中; ③有蓝牙信号的环境中; ④采用 OFDM 信号作为激励信号. 从图 7 可以发现②③情况下的数据包接收速率比①略低, 原因是蓝牙是基于跳频传播的频谱以及 Wi-Fi 信号在反向散射方面不是持续的通道. 所以, 与①相比, 结果相差不大. 由此可以看出, CBMA+ 可以与普通商用的 Wi-Fi 信号和蓝牙信号共存, 其影响可以忽略不计. 然而, 当我们使用 OFDM 信号作为激励信号, 数据包的接收率显著下降, 这是因为 OFDM 信号是间歇性的, 而标签不知道什么时候有信号可以反射, 如果标签是在 OFDM 不存在的情况下发送数据, 报文将被丢弃丢失, 这就导致了在这种情况下性能不佳.

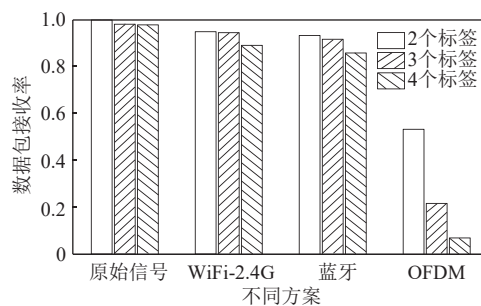


Fig. 7 Correct packet reception rate of system under different working conditions

图 7 不同工作条件下系统的正确数据包接收速率

3.2 系统仿真

由于实现 100 个标签以上的实际原型系统有一定困难, 我们利用 Matlab R2021a 搭建仿真实验平台, 通过对系统的误码率、信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR)、编码方式、标签数 4 个指标进行可视化的评价.

1) 使用 CBMA+ 系统模拟 100 个标签的原始基带信号与接收到的信号, 如图 8 所示.

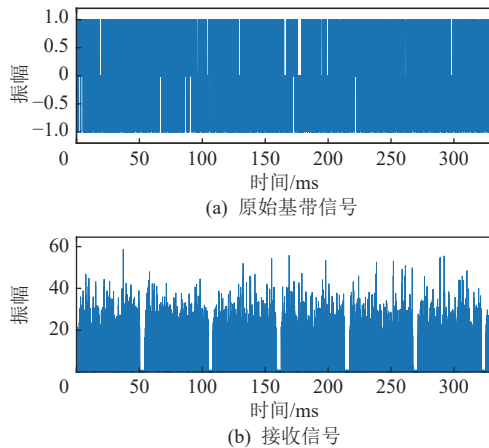


Fig. 8 Original signal and received signal

图 8 原始基带信号与接收信号

2) 扩频是无线通信中一种将窄带频谱 (低码片速率) 扩展为宽带频谱 (高码片速率) 的技术. 扩频操作就是将原始数据 (低码片速率) 与扩频码 (高码片速率) 进行异或的过程. 本文采用了 3 种扩频码进行扩频通信, 分别是伪随机噪声 (pseudorandom-noise, PN) 序列、巴克码 (Barker 码) 以及 Walsh 码. 其中 Barker 码又分为 7 位、11 位和 13 位 Barker 码, 它是一种具有特殊规则的二进制码字, 其特殊规则是: 一个 n 位 Barker 码 $\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ 的每个码元只可能取值 +1 或者 -1. PN 序列是一种随机序列, 与随机信号不同的是 PN 序列可以重复产生和处理, 它具有平衡特性、游程特性以及相关特性. Walsh 码是一种同步正交码, 是根据 Hadamard 矩阵中的 “+1” 和 “-1” 的交变次数重新排列得到 Walsh 矩阵, 它具有比较好的自相关和互相关特性. 并且, Walsh 码比较容易生成, 使用起来比较方便. 在本文中我们设计生成一个 256 阶的矩阵, 由于 Walsh 码是同步正交码, 所以在本文设计的多标签的情况下, 其性能方面比其他的扩频码要好. 如图 9 所示, 100 个标签使用上述 3 种扩频码在信噪比为 $(-10 \text{ dB}, 10 \text{ dB})$ 区间中仿真 100 次, 当信噪比为 10 dB 时, 扩频码采用 Walsh 码的误码率最低.

3) 本文采用 3 种编码方式, 其中 RS (Reed-Solomon) 编码是一种线性纠错码, 它可以纠正随机错误和突

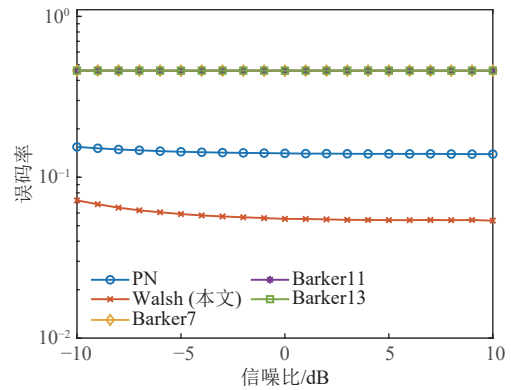


Fig. 9 BER of different code systems under different SNR

图 9 不同信噪比下不同码制的误码率

发错误. 同时, RS 编码也是一种多进制 BCH 码, 可以同时纠正多个码元错误. 低密度奇偶校验 (low-density parity-check, LDPC) 编码由于校验矩阵中的 “1” 的个数远远小于 “0” 的个数, 所以 LDPC 译码的复杂度比较低, 结构比较简单. 本文中卷积码选择码率为 1/2 的最优编码生成多项式 [15, 17]. 图 10 为采用 LDPC 编码、RS 编码、卷积编码, 以及采用 Walsh 扩频码仿真 100 次的实验结果, 当信噪比为 10 dB 时, 编码方式采用卷积编码时误码率最低.

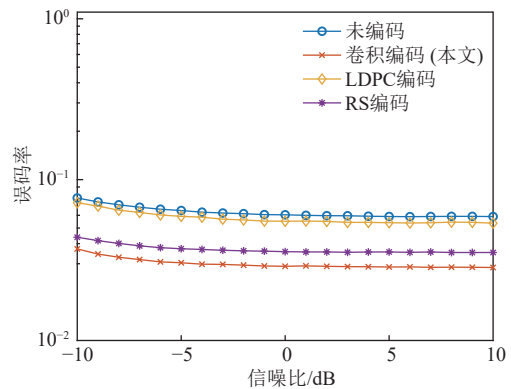


Fig. 10 Walsh codes and different coding types under different SNR

图 10 不同信噪比下的 Walsh 码和不同编码类型

4) 在多标签反射通信下, 使用 PN 序列扩频码, 比较不同的编码方式的误码率, 如图 11 所示, RS 编码方式的误码率最低. 迭代 200 次取均值后, 100 个标签进行反向散射通信误码率在 0.11 左右.

5) 在多标签反射通信下使用 Walsh 扩频码, 比较不同的编码方式下的误码率, 如图 12 所示, Walsh 编码和卷积编码相结合的方法比与 Walsh 编码和 RS 编码相结合的方法误码率要低. 迭代 200 次并取均值后, 100 个标签通信误码率在 0.028 左右.

6) 在多标签反射通信下, 通过图 11 和图 12 可以

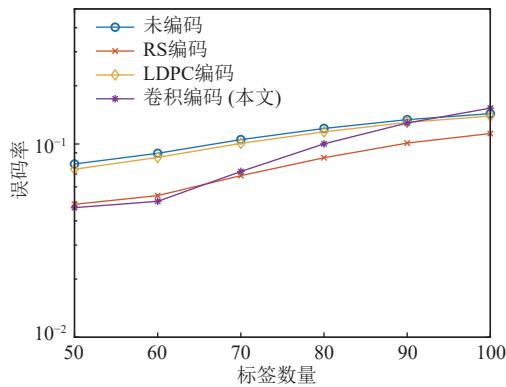


Fig. 11 BER performance comparison of various coding schemes with PN code in multiple-tag scenario

图 11 多标签场景下采用 PN 码的不同编码方案的误码率性能对比

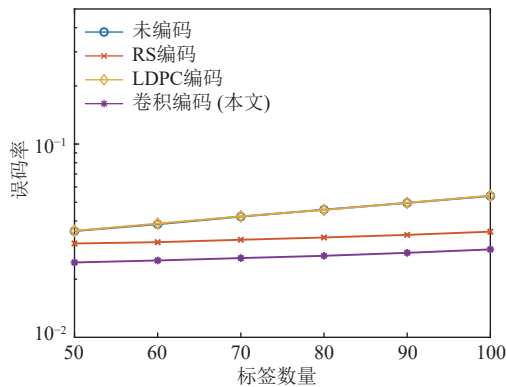


Fig. 12 BER performance comparison of various coding schemes with Walsh code in multiple-tag scenario

图 12 多标签场景下采用 Walsh 码的不同编码方案的误码率性能对比

观察到使用 PN 序列扩频码结合 RS 编码的方式和使用 Walsh 码结合卷积编码的方式在 100 个标签下的误码率最低, 图 13 将这 2 种方式进行对比, 可以看出 Walsh 码结合卷积码的方式在多标签的情况下效果是最好的. 可能存在的原因是由于卷积编码可以有

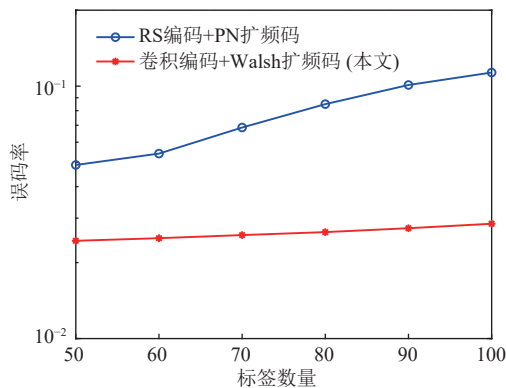


Fig. 13 Different spreading codes and different coding types under multi-tags

图 13 多标签下不同扩频码和不同编码类型

效抵抗信道噪声的影响, 能够很好地对传输过程中突发的错误进行纠错, 同时 Walsh 扩频码是一种正交码, 具有良好的正交性, 所有卷积编码结合 Walsh 扩频码的方式能够获得一个更低的误码率.

7) 在多标签反射通信中, 通过仿真证明采用分组解码比未采用分组解码误码率要低. 图 14 分别是未使用编码、使用卷积编码结合 Walsh 扩频码但未采用分组解码, 以及卷积编码结合 Walsh 扩频码采用分组算法进行解码的仿真结果图. 当信噪比为 10 dB 时, 未解码的误码率为 0.028, 采用分组解码的误码率为 0.023. 从仿真结果可以看出采用分组解码的误码率更低. 这可能是由于采用分组与维特比结合的译码方式可以相对减少其他标签在译码过程中的干扰, 从而降低误码率.

8) 我们比较了 CBMA+系统下不同标签的吞吐量, 使用 Walsh 码产生正交性比较强的码片作为地址码, 且采用纠错能力比较强的卷积编码方式. 从图 15

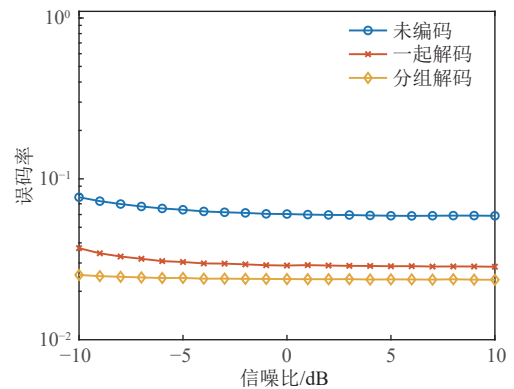


Fig. 14 Comparison of BER performance with and without the grouping algorithm under different SNR conditions

图 14 不同信噪比下是否使用分组算法的误码率性能对比

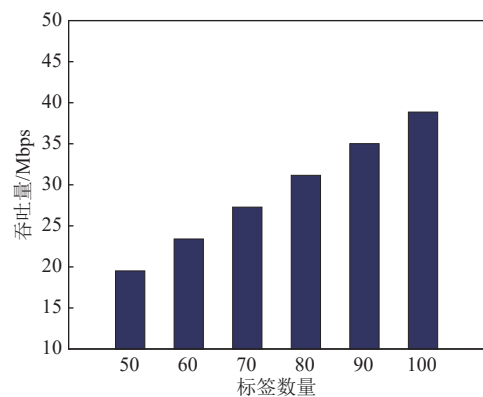


Fig. 15 Throughput with different numbers of tags under grouping decoding

图 15 分组解码下不同标签数量下的吞吐量

可以看到,随着标签数量的增长,吞吐量呈线性增长,当标签数量达到 100 时,每个节点以 400 Kbps 发送数据,吞吐量能达到近 39 Mbps.

4 总 结

本文针对多标签并发反向散射通信过程中多址接入问题,提出了基于编码的 CBMA+方案,同时利用分组算法进一步扩充接入容量或降低比特误码率.该系统支持多达 100 个反向散射标签,以可靠有效的方式并发反射感知数据. CBMA+系统使用 CDMA,并结合分组卷积译码的思想对多标签数据进行解码.通过原型系统和 MATLAB 仿真实验进行验证,结果表明所提出的传输方案能够有效降低系统的误码率,使得多标签反向散射通信系统的性能得到提高,系统吞吐量可达 39 Mbps,比特误码率可达 2%.

未来,我们将继续研究大规模反向散射通信,考虑加入 ACC 编码以进一步降低误码率,同时提高系统吞吐量,从而为未来的物联网和其他低功耗通信场景带来更多的可能性.此外,为进一步扩展系统的覆盖范围和应用场景,我们将对系统进行优化,使得更多标签被部署到硬件平台中.

作者贡献声明:何昕提出了算法思路和实验方案、完成实验并撰写论文;吴帆完成实验并撰写论文;祝玉军、许勇、杨盘隆提出指导意见并修改论文.

参 考 文 献

- [1] IoT Analytics. State of IoT 2023: Number of connected IoT devices growing 16% to 16.7 billion globally[EB/OL]. [2023-05-24]. <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices>
- [2] 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*, 2021, 23(7): 9775–9785
- [3] Gong Wei, Yuan Longzhi, Wang Qiwei, et al. Multiprotocol backscatter for personal IoT sensors[C]//Proc of the 16th Int Conf on Emerging Networking Experiments and Technologies. New York: ACM, 2020: 261–273
- [4] Zhang Pengyu, Josephson C, Bharadia D, et al. FreeRider: Backscatter communication using commodity radios[C]//Proc of the 13th Int Conf on Emerging Networking Experiments and Technologies. New York: ACM, 2017: 389–401
- [5] Zhao Renjie, Zhu Fengyuan, Feng Yuda, et al. OFDMA-enabled Wi-Fi backscatter[C/OL]//Proc of the 25th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2019 [2023-05-22]. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3300061.3300121>
- [6] Khan W U, Li Xingwang, Zeng Ming, et al. Backscatter-enabled NOMA for future 6G systems: A new optimization framework under imperfect SIC[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(5): 1669–1672
- [7] Kellogg B, Talla V, Gollakota S, et al. Passive Wi-Fi: Bringing low power to Wi-Fi transmissions[C]//Proc of the 13th USENIX Symp on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 16). Berkeley, CA: USENIX Association, 2016: 151–164
- [8] Zhang Maolin, Chen Si, Zhao Jia, et al. Commodity-level BLE backscatter[C]//Proc of the 19th Annual Int Conf on Mobile Systems, Applications, and Services. New York: ACM, 2021: 402–414
- [9] Zhao Jia, Gong Wei, Liu Jiangchuan. Spatial stream backscatter using commodity WiFi[C]//Proc of the 16th Annual Int Conf on Mobile Systems, Applications, and Services. New York: ACM, 2018: 191–203
- [10] Kim T, Lee W. Exploiting residual channel for implicit Wi-Fi backscatter networks[C]//Proc of the 37th IEEE Conf on Computer Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 1268–1276
- [11] Kellogg B, Parks A, Gollakota S, et al. Wi-Fi backscatter: Internet connectivity for RF-powered devices[C]//Proc of the 28th ACM Conf on SIGCOMM. New York: ACM, 2014: 607–618
- [12] Wang Wenjing, Xu Kangjun, Yan Yige, et al. Relay selection-based cooperative backscatter transmission with energy harvesting: Throughput maximization[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(7): 1533–1537
- [13] Liu V, Parks A, Talla V, et al. Ambient backscatter: Wireless communication out of thin air[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2013, 43(4): 39–50
- [14] Xu Yongjun, Yang Haoke, Li Guojun, et al. Energy-efficient optimization algorithm in multi-tag wireless-powered backscatter communication networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(10): 3492–3498 (in Chinese)
(徐勇军, 杨浩克, 李国军, 等. 多标签无线供电反向散射通信网络能效优化算法[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(10): 3492–3498)
- [15] Mi Nanhuan, Zhang Xiaoxue, He Xin, et al. CBMA: Coded-backscatter multiple access[C]//Proc of the 39th IEEE Int Conf on Distributed Computing Systems (ICDCS). Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 799–809
- [16] Huynh N V, Hoang D T, Lu Xiao, et al. Ambient backscatter communications: A contemporary survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 2889–2922
- [17] Wang Yue, Fan Kai. Ultra-lightweight RFID electronic ticket authentication scheme in IoT[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2018, 55(7): 1432–1439 (in Chinese)
(王悦, 樊凯. 物联网中超轻量级 RFID 电子票据安全认证方案[J]. *计算机研究与发展*, 2018, 55(7): 1432–1439)
- [18] Kimionis J, Bletsas A, Sahalos J N. Increased range bistatic scatter radio[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(3): 1091–1104

- [19] Fujiya Y, Edamatsu K, Shiba T, et al. Self-mixing noise reduction effect in Wi-Fi backscatter receiver by tx signal canceller[C]//Proc of the 24th Asia-Pacific Microwave Conf (APMC). Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 493–495
- [20] Lazaro A, Lazaro M, Villarino R. Room-level localization system based on LoRa backscatters[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 16004–16018
- [21] Rosenthal J D, Mandal A, Sathe V, et al. An all-digital 1 Mbps, 57 pJ/bit Bluetooth low energy (BLE) backscatter ASIC in 65 nm CMOS[C]//Proc of the 16th IEEE Int Conf on RFID (RFID). Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 109–113
- [22] Talla V, Hessar M, Kellogg B, et al. LoRa BackScatter: Enabling the vision of ubiquitous connectivity[C/OL]//Proc of the 19th ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies. New York: ACM, 2017 [2023-04-18]. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3130970>
- [23] Peng Yao, Shangguan Longfei, Hu Yue, et al. PLoRa: A passive long-range data network from ambient LoRa transmissions[C]//Proc of the 32nd ACM Conf on SIGCOMM. New York: ACM, 2018: 147–160
- [24] Guo Xiuzhen, Shangguan Longfei, He Yuan, et al. ALoba: Rethinking ON-OFF keying modulation for ambient LoRa backscatter[C]//Proc of the 18th Conf on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2020: 192–204
- [25] Jiang Jinyan, Xu Zhenqiang, Dang Fan, et al. Long-range ambient LoRa backscatter with parallel decoding[C]//Proc of the 27th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2021: 684–696
- [26] Hessar M, Najafi A, Gollakota S. NetScatter: Enabling large-scale backscatter networks[C]//Proc of the 16th USENIX Symp on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 19). Berkeley, CA: USENIX Association, 2019: 271–284
- [27] Tong Xinyu, Zhu Fengyuan, Wan Yang, et al. Batch localization based on OFDMA backscatter[C/OL]//Proc of the 21st ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies. New York: ACM, 2019 [2023-03-27]. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3314412>
- [28] He Xin, Zhou Xiaobo, Anwar K, et al. Estimation of observation error probability in wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(6): 1073–1076
- [29] Agee B G. Solving the near-far problem: Exploitation of Spatial and Spectral Diversity in Wireless Personal Communication Networks[M]//Wireless Personal Communications: Trends and Challenges. Berlin: Springer, 1994: 69–80
- [30] Ou Jiajue, Li Mo, Zheng Yuanqing. Come and be served: Parallel decoding for cots RFID tags[C]//Proc of the 21st Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2015:

500–511

- [31] Jin Meng, He Yuan, Meng Xin, et al. FlipTracer: Practical parallel decoding for backscatter communication[C]//Proc of the 23rd Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2017: 275–287



He Xin, born in 1986. PhD, professor, master supervisor. His main research interests include information theory, coding theory, low-power backscatter communication, and wireless sensing.

何 昕, 1986 年生. 博士, 教授, 硕士生导师. 主要研究方向为信息论、编码理论、低功耗反射通信、无线感知.



Wu Fan, born in 1999. Master candidate. Her main research interests include Internet of things and backscatter communication.

吴 帆, 1999 年生. 硕士研究生. 主要研究方向为物联网、反射通信.



Zhu Yujun, born in 1982. PhD, associate professor, master supervisor. His main research interest includes wireless sensor networks.

祝玉军, 1982 年生. 博士, 副教授, 硕士生导师. 主要研究方向为无线传感器网络.



Xu Yong, born in 1966. PhD, professor, master supervisor. His main research interests include computer network security, key management and Internet of things security.

许 勇, 1966 年生. 博士, 教授, 硕士生导师. 主要研究方向为计算机网络安全、密钥管理、物联网安全.



Yang Panlong, born in 1977. PhD, professor, PhD supervisor. His main research interests include wireless backscattering communication, AIoT, and integrated wireless sensing.

杨盘隆, 1977 年生. 博士, 教授, 博士生导师. 主要研究方向为无线反射通信、智能物联网和无线通感一体化.