

频谱受限下容量优化的多标签并发反射通信系统

李向阳 王山岳 张 弛 闫宇博 谈海生

(中国科学技术大学计算机科学与技术学院 合肥 230027)

(xiangyangli@ustc.edu.cn)

Enhanced Capacity for Multi-Tag Concurrent Backscatter Communication Systems under Spectrum Constraints

Li Xiangyang, Wang Shanyue, Zhang Chi, Yan Yubo, and Tan Haisheng

(School of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

Abstract Passive backscatter communication technology, due to its microwatt-level power consumption, makes IoT devices easy to be deployed and maintenance-free. The multi-tag concurrent communication technology enables tags to avoid complex protocols such as collision avoidance, thus reducing device power consumption while increasing the system throughput and scale. However, the limited spectrum resources available to backscatter tags lead to issues of mutual interference and low spectrum utilization in multi-tag concurrency. To this end, we propose CamScatter, a capacity-enhanced multi-tag parallel backscatter communication system. We design strategies for maximizing channel division and efficient allocation with limited spectrum resources, avoiding interference among tags, and significantly enhancing the system capacity. In the preprocessing phase, a bandwidth-maximized channel division algorithm is proposed, providing multiple interference-free channel division schemes for system communication. In the initialization phase, an optimized channel and rate allocation scheme is proposed, assigning the most suitable channels and rates to tags based on the signal-to-noise ratio (SNR) of all tags in the system, thereby mitigating signal interference caused by tag energy differences and improving system throughput. Additionally, during system working, it uses sideband aggregation and matched filtering techniques to enhance signals strength of the tags to be demodulated, reducing interference from other tags. The bandwidth range that this system utilizes is from 142.4 kHz to 773.5 kHz. Due to harmonic interference limitations, the theoretical maximum spectrum utilization rate is 81.1%, and the maximum system capacity without interference is 2 925 kbps. Extensive simulation experiments indicate that the algorithm proposed in this paper can achieve a spectrum utilization rate of 78.6%, with a maximum system capacity of up to 1 914 kbps. Actual deployment experiments verify that our system CamScatter supports a maximum throughput of 305 kbps and can handle concurrent communication with up to 30 tags, effectively resolving the issue of mutual interference between tags.

Key words backscatter communication; parallel communication; harmonic interference; near-far effect; capacity enhancing

收稿日期: 2024-05-31; 修回日期: 2024-07-31

基金项目: 科技创新 2030 — “新一代人工智能”重大项目 (2021ZD0110400); 国家自然科学基金重点项目 (62132009, 62072424, U20A20181); 中国科学院前沿科学重点研究计划项目 (ZDBS-LY-JSC001); 安徽省自然科学基金项目 (2308085MF221); 合肥市自然科学基金项目 (2022016); 中央高校基本科研业务费专项资金

This work was supported by the 2030 National Key AI Program of China (2021ZD0110400), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (62132009, 62072424, U20A20181), the Key Research Program of Frontier Sciences, CAS (ZDBS-LY-JSC001), Anhui Provincial Natural Science Foundation (2308085MF221), Hefei Municipal Natural Science Foundation (2022016), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities.

通信作者: 谈海生 (hstan@ustc.edu.cn)

摘 要 无源反射通信技术因其微瓦级别的功耗,使得物联网设备易于部署且免维护.多标签并发反射通信技术使反射标签无需实现冲突避免等复杂协议,从而在降低设备功耗的同时提升系统的吞吐量和规模.然而,反射标签可用的频谱资源有限,导致多标签并发面临相互干扰和频谱利用效率低的问题.为此,提出了CamScatter,一个容量优化的多标签并发反射通信系统,设计了针对有限频谱资源进行最优化信道划分和高效分配的策略,避免标签之间的干扰,显著提升系统的容量.在预处理阶段,提出了带宽最大化的信道划分算法,为系统通信提供频谱上互不干扰且带宽利用率高的信道划分方案.在初始化阶段,提出了高效信道分配和最优化速率分配方案,根据系统中所有标签的信噪比,为标签分配最合适的信道和速率,以解决标签能量差异造成的信号干扰,提升系统吞吐量.在运行阶段,系统利用边带聚合和匹配滤波技术增强待解调标签信号的强度,减轻其他标签的信号干扰.系统可以利用的带宽范围为142.4~773.5 kHz,由于谐波干扰限制,理论上最大频谱利用率为81.1%,避免干扰的情况下最大系统容量为2 925 kbps.仿真实验表明,算法可以实现78.6%的频谱利用率,最大系统容量可达1 914 kbps.实际部署实验验证,本系统最高支持305 kbps的系统吞吐量,最多可支持30个标签的并发通信,有效解决了标签之间的相互干扰问题.

关键词 反射通信;并发通信;谐波干扰;远近效应;容量优化

中图法分类号 TP391

物联网(Internet of things, IoT)技术将物理世界和数字世界融合在一起,为家庭、城市、农业和医疗等各种应用的连通性和自动化开辟了新的机遇与挑战.这项技术不仅提高了操作效率,还通过自动化日常任务和实时响应环境变化便捷了日常生活.随着物联网设备的普及,它们有望创造更加智能的环境感知,实现万物互联的愿景.无源物联网(Passive IoT)指的是一类无需内部电源(如电池)即可运行的物联网设备^[1].这些设备利用外部能源,如环境光、射频波或温差来供电.支持无源物联网的常见技术包括射频识别(radio frequency identification, RFID)和近场通信(near field communication, NFC),它们通过被动能量收集实现数据传输和设备激活,通过被动反射通信的方式传输自身的数据.这种方法显著降低了维护需求和环境影响,使物联网成为供应链管理、智能标签和建筑自动化的理想解决方案.其中,反射通信技术因其在微瓦级别的超低功耗而在能源受限设备的通信领域中占据领先地位^[2].一个反射通信系统主要由激励源、反射标签和接收端组成.反射标签从激励源信号中获取能量,同时把自身的信号加载到激励源信号当中并反射出去,这个过程标签不自己产生信号,因此可以达到超低功耗,结合获能模块可以实现无源工作.先前的工作在反射通信系统的能耗^[3-4]、距离^[5-6]和吞吐量^[7-8]方面都实现了巨大的突破.同时,低功耗设备(例如无源标签)在多个领域得到了广泛应用,例如环境感知^[9-10]和物体跟踪^[11-13]等.因此,我们可以预见,一个可以支持多个标签的低功耗反向

散射系统在未来能够提供多种环境感知功能,这需要系统中的标签可以协同工作.然而由于反射通信标签可用能源有限,标签获取的能量无法加载用于信号解调的高功耗器件,例如直接数字频率合成器(direct digital synthesizer, DDS)和压控振荡器(voltage-controlled oscillator, VCO),现有的协议比如载波侦听多路访问/冲突避免(carrier sense multiple access with collision avoidance, CSMA/CA)难以在标签上实现,这会大大增加在多个标签通信时产生碰撞的概率,发生碰撞时标签也无法感知,这对系统的吞吐量和扩展能力带来了限制.因此一个支持多标签并发通信的反射通信系统是必要的.

一些先前研究在解决大规模反向散射系统的并发问题上取得了杰出的成果,例如NetScatter^[14]、OFDMA反射通信^[15]、P²LoRa^[16]等. NetScatter和P²LoRa实现了基于LoRa信号的大规模复用,但因其使用扩频编、解码难以实现标签以高吞吐量传输数据,限制了大规模系统的应用场景. OFDMA反射通信虽能达到高吞吐量,但是它利用高功耗的现场可编程逻辑门阵列(field-programmable gate array, FPGA)模块使标签可以拥有大量可用的频谱空间.但实际上由于标签的低功耗限制和环境信号对频谱的占用,其可用的频谱空间极其有限,在窄频带内做并发通信会大大增加标签信号碰撞的概率.同时,先前的工作中所有标签占用的信道带宽相同,这不适合实际场景中多种类型的传感器设备协同工作的需求,对于带宽要求高的标签会限制其传输速率,对带宽要求低的标

签会造成频谱浪费。

为了解决这些问题,本文提出了 CamScatter, 一个容量优化的多标签并发反射通信系统,主要解决了在多标签并发通信的场景下,带宽不一致的反射通信标签如何高效地利用极其有限的频谱资源解决互不干扰通信的问题,使得反射通信系统更适用于实际部署。为了实现这样的系统,我们需要克服2个挑战:

1) 谐波干扰. 反射通信标签由于低功耗的限制,只能通过发送方波信号进行移频来实现频分复用,在反射通信网络中不可避免地会遇到谐波干扰问题. 使用方波反射通信调制时,标签信号的谐波会强烈影响其他信道的性能. 例如,频率偏移为 100 kHz 的信道可以产生高次谐波,其三次和五次谐波仍具有很高的功率,会干扰频率偏移在 300 kHz 和 500 kHz 的信道. 先前标签消除谐波的工作^[17]会增加标签设计的复杂性,同时会降低可用频段到原来的 1/4,这并不适合频谱资源极其有限的反射通信系统。

2) 远近效应. 反射标签摆放的位置不同,与发送、接收端的距离会远近不一,这就导致每一个标签反射信号的强度差异很大. 由于反射通信是一个经历了2个信道的过程,其衰减会比主动通信更强,不同位置的反射通信标签的信号之间的差距会更大. 强反射信号由于滤波器的频谱泄露会覆盖掉弱反射信号,这就导致了强反射信号和弱反射信号之间的互相干扰. 之前的方法^[17]根据标签反射信号的信号强度来对标签的信号能量进行调整,但是这种方法会以牺牲标签的数据发送速率为代价,限制系统的吞吐量。

为了在有限的频谱资源下解决标签之间的相互干扰,同时尽可能提高系统总容量,本文提出了信道划分、信道分配和速率分配的三步策略. 首先设计了一种基于线性规划的抗干扰信道划分算法,它可以筛选出多组高带宽且无碰撞的信道供标签通信,解决了谐波干扰问题;之后提出了高效信道分配方案,在满足每一个标签都分配到最合适的信道的同时,也降低了相邻信道之间的干扰;在此基础上,设计了一种最优化速率分配策略,可以根据标签事实的信噪比为其分配不产生干扰的最大速率;最后在运行阶段,利用边带聚合和匹配滤波的解调方法,增强了目标信号的信噪比,提升了判决准确性。

本文贡献如下:

1) 设计了一个带宽受限下的容量优化的多标签反射通信系统 CamScatter, 它可以最优化利用极度有

限的频谱空间,实现高容量、高吞吐量的多标签并发反射通信。

2) 为了解决标签之间因谐波和远近效应造成的干扰,本文在信道层面、通信层面、标签信号层面分别提出了抗干扰信道划分、高效信道分配以及最优化速率分配的策略. 3 种策略均保证在各自层面把干扰降到最低的同时,也保证了对系统容量的优化。

3) 理论上,本系统可以利用的带宽范围为 142.4 ~ 773.5 kHz. 受谐波干扰限制,理论上最大频谱利用率为 81.1%,避免干扰情况下最大系统容量为 2 925 kbps. 仿真实验表明,本文算法可以实现 78.6% 的频谱利用率,最大系统容量可达 1 914 kbps. 相比于现有的并发反射通信工作,本系统可以在可用带宽有限的条件下同时实现高吞吐量和高并发量,也可以支持反射标签以灵活的带宽工作。

4) 构建了反射标签的原型,利用软件无线电设备搭建了多标签并发通信系统,并在不同场景下进行了系统性能的测试. 实验结果表明,本系统最高可以达到 30 个标签并发通信,最大吞吐量可达 305 kbps.

1 相关工作

1.1 反射通信系统

本文的反射通信系统主要由3部分组成:激励源(transmitter, TX)、无源反射标签(tags)和接收端(receiver, RX),如图1所示. 激励源发送激励信号给标签,标签从激励信号中获取能量,同时把自己的信号加载到激励信号中反射给接收端,接收端通过解调标签反射后的信号得到标签的数据. 这个过程中,标签不会产生信号,只需要通过被动反射的方式即可发送自身的数据,因此可以达到极低功耗. 先前的反射通信系统推动了超低功耗无线连接技术的发展. 这些研究工作专注于设计与现有无线标准兼容的反向散射方案^[17-22],并着力改善反向散射的吞吐量^[8,23]、覆盖范围^[6,16-17,24]、可靠性^[25]以及可部署性^[26-27]. 目前的工作在单标签反射通信方面具有良好的性能,但是为了实现万物互联的愿景,实现多标签的并发通信方案可以提升系统的吞吐量,为系统中的标签提升更多的通信机会。

1.2 并发反射通信技术

在反向散射网络中的大规模并行通信领域,许多研究工作在不同方面做出了杰出贡献^[9,14-16]. NetScatter^[14]提出了一个协议,该协议使用啁啾扩频调制和复杂标签结构来增强反向散射系统的并发性,最终可以

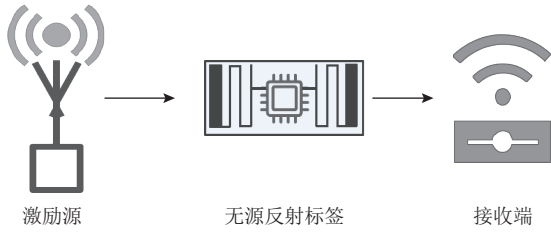


Fig. 1 Backscatter communication systems

图1 反射通信系统

实现 256 个标签的并发通信. P²LoRa^[16] 通过改变 LoRa 包的移频来实现并行解码标签, 然而, 基于啁啾的通信限制了系统的吞吐量, 虽然系统可以支持 101 个标签并发通信, 但是其每个标签的吞吐量只有 0.11 kbps 以下. OFDMA 反向散射^[15] 在反向散射系统中引入了正交频分复用多址 (orthogonal frequency division multiple access, OFDMA) 技术, DigiScatter^[28] 采用 IDFT 支持更高并发的系统, 该系统理论上可以支持 1 019 个标签的并发通信. 此外, 上述所有工作还面临 2 个问题: 一方面, 它们需要标签的能量差异在一个较小的范围内, 否则无法解决强信号对弱信号的带间干扰. 另一方面, 它们仅考虑了如何实现大规模的并发, 忽略了由于标签的能耗限制导致的标签可用频谱空间有限. 由于 OFDMA 反射标签的子载波本身需要占据大带宽, 因此在可用带宽有限的条件下, 能够实现的反射标签并发数量有限. MultiRider^[29] 针对大带宽下的 WiFi 反射通信系统中的并发问题, 提出了一种基于消除干扰的并发反射通信方案, 可以提升 WiFi 反射通信的系统利用率, 提升了 WiFi 反射通信下系统的容量, 但该方案是基于正交频分复用 (orthogonal frequency division multiple, OFDM) 信号由许多个子载波构成这一特性来实现的, 只支持以 OFDM 作为载体的反射通信. WiB-MAC^[30] 通过在数据链路层对多个标签进行调度来减少多个标签通信时的碰撞问题, 可以支持上百个标签工作, 但是它只有 2 个信道供标签并发通信, 对于系统吞吐量的提升有限.

2 背景介绍

2.1 反射通信的基本原理

1) 激励源 (发送端). 在无线通信系统中, 激励源发送信号为反射通信标签提供能量以及传输数据的载波. 载波信号是单一频率的正弦信号, 可以表示为 $\sin(2\pi f_c t)$, 其中 f_c 为载波频率, t 表示时间.

2) 反射标签. 反射标签由微控制器和天线组成. 微控制器 (microcontroller unit, MCU) 或 FPGA 模块通

过产生方波信号来控制单刀双掷射频开关, 决定是否反射来自激励源的信号. 此开关通过连接 2 种不同的天线阻抗来工作, 方波信号使天线阻抗在反射与吸收之间切换, 从而在激励信号上加载无源反射标签的数据. 无源反射标签反射的信号能量 P_{tag} 可以表示为^[31]:

$$P_{\text{tag}} = \frac{P_{\text{TX}} G_{\text{TX}} \Delta_r}{4\pi d^2}, \quad (1)$$

其中 P_{TX} 和 G_{TX} 分别是发送端的发射能量和天线增益, d 是发送端和反射标签之间的距离, Δ_r 是差分雷达散射截面 (radar cross section, RCS), 可以表示为下形式^[32]:

$$\Delta_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{\text{Tag}}^2 |\Gamma_1 - \Gamma_2|, \quad (2)$$

其中 λ 是信号载波的波长, G_{Tag} 反射标签的天线增益.

$\Gamma_{1,2}$ 是根据 2 个不同负载阻抗 $Z_{c_{1,2}}$ 的复数功率波反射系数, 表示为^[2]:

$$\Gamma_{1,2} = \frac{Z_{c_{1,2}} - Z_a^*}{Z_{c_{1,2}} + Z_a^*}, \quad (3)$$

其中, $Z_a^* = R_a + jX_a$ 是复数表示的天线阻抗, $Z_{c_{1,2}} = R_{c_{1,2}} + jX_{c_{1,2}}$ 是复数表示的标签电路阻抗.

反射标签通信的过程, 只需要通过处理器产生的方波信号控制单刀双掷开关即可把自己的数据加载到激励信号中, 并把自己的信号通过反射的方式发送出去. 这种方式不需要任何高功耗的调制器件, 因此可以达到超低功耗^[2]. 因此反射标签的功耗和处理器的频率是相关的, 频率越高, 功耗越大, 可以实现的数据速率和频谱利用范围会越大^[33].

3) 频谱搬移. 频谱搬移是标签的调制方式, 也称为空中调制, 是无线通信中的一种核心技术, 通过改变载波频率来传输信息. 在这个过程中, 边带反散调制通过改变天线的 RCS, 实现对载波频率的偏移. 通过对天线 RCS 的调制, 入射信号与调制信号相乘, 从而在频率上产生偏移. 具体地, 这一过程通常通过使用微控制器生成频率为 Δf 的方波信号来控制天线的阻抗实现. 对该方波进行傅里叶分析, 我们得到表达式:

$$\text{Square}(\Delta f t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(2\pi n \Delta f t). \quad (4)$$

方波的基波 (第 1 次谐波) 为频率 Δf 的正弦波. 因此, 在单标签的反射通信系统中, 方波可以通过其基波的正弦信号 $\sin(2\pi \Delta f t)$ 进行简化. 在反射过程中, 这可以表达为发射信号和调制信号的乘积, 具体为:

$$\begin{aligned} \sin(2\pi f_c t) \sin(2\pi \Delta f t) &= \frac{1}{2} \cos(2\pi (f_c - \Delta f) t) - \\ &\quad \frac{1}{2} \cos(2\pi (f_c + \Delta f) t). \end{aligned} \quad (5)$$

这个过程被称为空中调制,它生成的窄带信号频率为 $f_c - \Delta f$ (负向偏移)和 $f_c + \Delta f$ (正向偏移),实现了一种镜像对称的频率搬移.值得注意的是,这种反射过程的能量消耗极低,功耗仅为几微瓦.这种低能耗特性使得无源反射标签在能效上具有显著优势,是其在多种无线通信系统中被广泛应用的原因.

4)接收端.在无线通信系统中,接收端可以选择其中一个偏移频率来接收反射信号.为了简化讨论过程,我们在此假设选择负向偏移,即 $f_c - \Delta f$,作为接收频率.如前所述,这个反射信号是由反射标签通过调制自身的控制信号和发送端激励信号而生成的新信号.因为这个新的信号与原始信号不在同一频率,所以它不会受到原始信号的干扰.这是一个非常重要的特性,它给我们在同一无线通信系统中支持多个反射标签并发通信提供了机会.

在一个固定的场景中,例如一个仓库或者一个工厂,多个无源反射标签可以共享同一个信号发送端来生成各自的反射信号.这使得我们可以在一个系统中挂载大量的无源反射标签,从而获取更多的数据和信息.更进一步地,我们可以借鉴通信中的频分多址(frequency division multiple access, FDMA)技术的思想,给每个反射标签分配一个不同的偏移频率.通过这种方式,我们可以确保这些反射信号在频率上互不干扰.这样,即使在一个包含大量标签的系统中,我们也可以确保每个标签都可以准确地传输其数据.

总的来说,通过选择适当的偏移频率,并利用FDMA的思想,我们可以在一个无线通信系统中同时使用多个无源反射标签.这使得无源反射标签在许多应用中都具有很大的潜力,例如在物联网、无线传感器网络和远程监控系统中.

2.2 通信基础理论

在理想条件下,信号的带宽决定了能够传输的最大数据速率.简单地说,带宽越宽,允许的发送速率越高.根据奈奎斯特准则,无噪声信道的最大数据传输速率 C 可以通过以下公式计算:

$$C = 2W \lg M, \quad (6)$$

其中 W 是信道带宽(以Hz为单位), M 是每个符号的离散电平数(例如,二进制为2,四进制为4等).

在给定的带宽和信噪比条件下,无误差传输的最大数据速率,即信道容量,可以用香农公式来表示:

$$C = W \lg(1 + SNR), \quad (7)$$

其中 C 是信道容量,而 SNR 是信噪比,表示信号功率与噪声功率的比值.式(17)表明,信道的容量与带宽

成正比,与信噪比对数成正比,意味着增加带宽或改善信噪比都可以提高通信系统的数据传输速率.

我们的系统选择2-OOK的调制方式来发送标签数据,在此方式下,标签在发送符号1时,以 Δf 的频率切换射频开关的状态产生方波;另一方面,在发送符号0时,标签始终关闭射频开关,不调制信号.此时标签信号的信噪比可以计算为

$$SNR = \frac{E_b}{N_0} = \frac{P_s \times T}{N_0} = \frac{P_s}{N_0 \times R_b}, \quad (8)$$

其中, E_b 表示单位比特的能量, N_0 表示噪声的功率谱密度,单位是焦耳(J), T 表示每一个比特所占据的时间, P_s 表示信号的功率谱密度, R_b 表示信号的传输速率,单位是比特每秒(bps)且 $T = 1/R_b$.同时在理想情况下,此种调制方式的每一个比特所占的时间是 T ,因此信号的带宽 $W = 1/T$ 即 $W = R_b$.

因此根据香农公式,反射信号的信道容量为:

$$C = W \lg(1 + SNR) = R_b \lg \left(1 + \frac{P_s}{N_0 \times R_b} \right). \quad (9)$$

在实际系统中,由于各种因素,如信道特性、噪声水平等的影响,实际的带宽可能会略微超过或低于数据速率所表示的值,我们的系统假设 $W = kR_b$ 以估计标签的信道容量和带宽,在实际运行过程中我们可以控制标签发送的速率并接收此速率下信号的带宽来计算 k 的值.根据式(9),我们通过改变标签传输速率 R_b 的值改变标签信号的信噪比.

本文思路:由于远近效应的影响,如果相邻2个信道的标签信号信噪比差距过大,强信号对弱信号产生干扰.为了解决此问题,本文的基本思想是通过改变信号速率来调整标签的信噪比.对于强信号,我们提升其数据速率来降低信噪比;对于弱信号,我们偏向于降低数据速率,提升其信噪比.同时信号的数据速率越高,占用的带宽会越宽,会在频域上增加对其他标签信号干扰的可能性.因此如何合理地分配每一个标签的带宽和信噪比,使得系统中所有标签既能够相互之间不干扰又能保证系统总容量最大,即如何利用有限的频谱空间使其实现容量尽可能大的数据传输,是本系统研究的一个主要问题.

2.3 有限带宽下实现容量优化的挑战

为了实现多标签并发反射通信系统对有限带宽的高效利用,最大挑战是如何解决多个标签之间的干扰.一个可行的方案是通过频谱搬移技术把多个标签的信号移到互不干扰的频段,每一个移频的频段当作一个信道来通信.这样的操作只需要一个射频开关就可以解决,功耗仅为微瓦级别.但是在实际

的部署和使用中, 反射通信标签的可用频谱是有限的. 在反射通信系统中, 由于反射通信标签自身计算、存储资源有限, 无法支持高频的时钟信号来产生更大范围的移频, 因此对于反射通信标签来说, 它能够利用的信号频段是有限的, 远小于有源通信系统^[33-34]. 如果来实现标签的无源通信, 其处理器的频率就会受到限制, 因此我们的系统解决的是无源标签在可用频谱受限的情况之下如何对频谱利用率进行优化. 所以如何在有限的频谱资源之下, 实现标签之间互相不干扰的并发反射通信, 同时尽可能提升系统总容量, 是我们的系统要实现的主要目标. 为了实现这样的目标, 我们的系统面临着谐波干扰和远近效应的挑战.

1) 谐波干扰. 由式(5)可知, 反射通信标签在进行通信的过程中, 会产生高次谐波信号, 每个谐波的能量与谐波的次数成平方反比, 虽然基波的能量显著高于其他谐波信号, 但是三次谐波和五次谐波仅比基波信号分别低约 9.5 dB 和 14 dB. 因此在并发反射通信系统中, 标签的三次谐波、五次谐波还是会对其他反射通信标签的信道产生影响.

谐波干扰的一个例子在图 2(a) 中展示, 其中信号 1 和信号 2 的三次谐波分别对信号 2 和信号 3 产生了频谱重叠. 当它们同时传输时, 接收器难以区分重叠在一块的 2 个信号, 因此在解调过程中很容易引入错误. Spray^[7] 中为了验证谐波干扰, 以 2 个标签并发通信的场景进行了实验. 实验结果说明, 当信号干扰噪声比(SINR)小于 10 dB 时, 正确解调标签信号变得困难, 分别为在三次谐波、五次谐波干扰和无谐波干扰下, 无误码的解调结果分别占 44%, 68% 以及 99%. 因此, 避免谐波干扰对于多标签并发通信来说是必要的.

先前工作针对谐波干扰提出了解决方案^[7,17].

Spray^[7] 提出了一个解决谐波干扰的信道规划方式, 可以选择带宽最大的信道划分方案给反射标签, 但是它没有考虑在系统实际运行时的标签的信噪比分布情况, 总带宽最大的信道划分并不适合当前标签信噪比的分布情况. Spray 中得到的最大化信道规划方案的信道带宽之间往往差异比较大, 对于标签信噪比分布均匀的情况下, 总会有标签由于信道带宽的限制难以实现更高的容量. Talla 等人^[17] 提出了一种谐波消除的方案, 该方案通过引入额外的电压水平来更好地近似正弦信号, 模仿特定的无线电并获得更干净的频率谱. 这种方法可以有效地消除第三谐波和第五谐波, 但不适合大规模部署低功耗设备. 这是因为它需要生成一个周期是仅生成方波的 4 倍的近似余弦波, 如图 2(b) 所示. 这种近似波会导致系统可用带宽减少到使用方波的 1/4. 如果要达到相同的带宽, 我们需要至少将处理器频率增加 4 倍, 这会增加标签的功耗. 我们避免谐波干扰的解决方案是在链路级应用一种避免算法而不是在标签中进行消除. 因此, 我们采用基于方波的信号传输方式, 它不会减少可用带宽, 更适合多标签并发通信.

2) 远近效应. 在实际运行的过程中, 当相邻信道的标签信号过强, 会使得目标信号的解调错误率大大增加. 因此, 我们的系统应该尽量保证相邻 2 个信道中信号的强度相差不大. 在反射通信系统中, 标签的信号强度和标签的位置存在很大的关系, 但是在系统实际运行过程中, 标签的位置是基本不变的, 我们需要一定的机制来调整反射标签信号的强度. NetScatter 提出了一种改变电路反射系数的方式来调整标签的信号强度. 但是根据 2.2 节中的介绍, 对于强度高的信号来说, 如果要降低其信号强度来减小对其他信号的干扰, 在信号带宽不变的情况下, 会降低其信道容量. 因此, 这样的方法是以牺牲标签的速

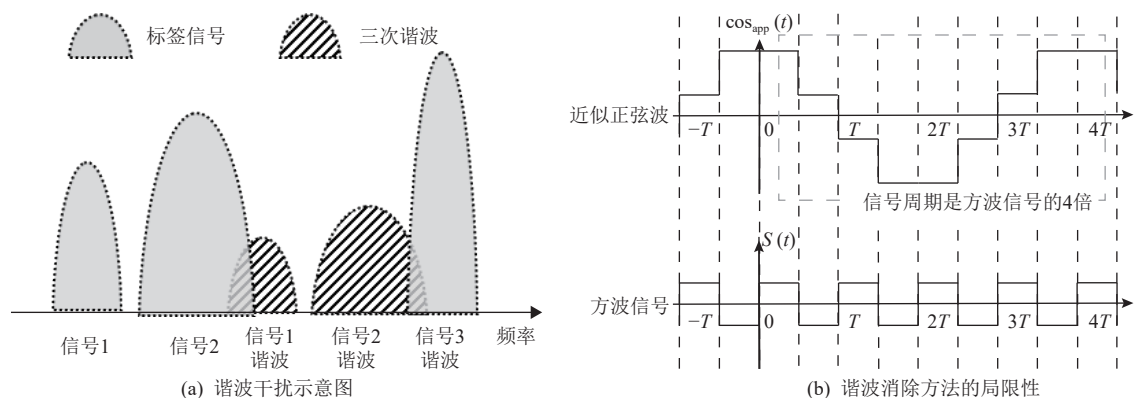


Fig. 2 Introduction of harmonic interference

图 2 谐波干扰介绍

率为代价实现的,不利于提升系统的总容量.

3 系统概况

图3是CamScatter的系统概况图,我们基于双基站反射通信架构来搭建,该架构由3部分组成.

1)激励源.负责发送激励信号给标签,激励信号的表达式为 $\sin(2\pi f_c t)$,同时激励信号中携带控制命令,控制命令包含,即①标签的工作模式,即轮询、并行通信;②标签的id,负责控制哪些标签发数据;③标签对应的信道和带宽.

2)反射标签.反射通信标签可以解析激励源发来的命令,并能够根据命令中的信息修改自身的信道和带宽.其中,修改通信信道的方式可以通过改变自身方波信号发送频率的形式来实现,多个标签并发通信时,每一个标签都有自己独特的方波信号频率,标签 i 对应的方波信号频率为 Δf_i ,根据频谱搬移的原理,接收端可以在接收信号的 $f_c + \Delta f_i$ 和 $f_c - \Delta f_i$ 处接收到该反射标签的信号.标签修改带宽的方式是通过改变自身数据的发送速率来实现的,信号速率越大,标签的带宽越宽.

CamScatter的执行过程分为3个阶段.第1阶段是预处理,获取一组互不干扰的最大带宽信道划分方案.我们的信道划分方案保证了3个要求:信道之间不相互干扰、标签信道对应的谐波频段不会对其

他信道造成干扰、所有信道的带宽之和最大.在此过程中会有多个满足带宽之和最大的信道带宽划分方案,我们设计了一个筛选方法,根据频点的分散程度筛选出抗干扰的信道划分方案.第2阶段是初始化,在系统刚开始运行的时候执行轮询读取,接收端会从标签返回的信标中读取到每一个信号的信噪比,并根据此信噪比数据执行信道分配算法,给系统中的每一个标签分配到合适的信道,之后执行最优标签速率分配算法,得到满足标签容量之和最大且标签之间互不干扰的方案.第3阶段是运行阶段,在系统得到了每一个标签合适的信道、速率分配方案之后,激励源会发送对应的分配命令给标签,标签根据命令在对应的信道分配带宽通信,接收端接收多个标签的并行信号并解调,为了尽可能降低多标签之间的相互干扰,我们设计了一种抗干扰的多标签解调方案,在接收的信号中提升待解调信号的信噪比,再针对标签OOK调制的方式进行解调.

3)接收端.接收端负责接收标签的反射信号.在收到信号之后,可以在解调标签数据的同时,测量每一个标签的带宽和信噪比来计算信道容量.在系统运行的初始阶段,接收端会根据每一个反射通信标签轮询的结果执行高效标签信道分配与最优化标签速率分配算法,得到满足系统容量最大化条件下的〈标签,信道,带宽〉分配方案.

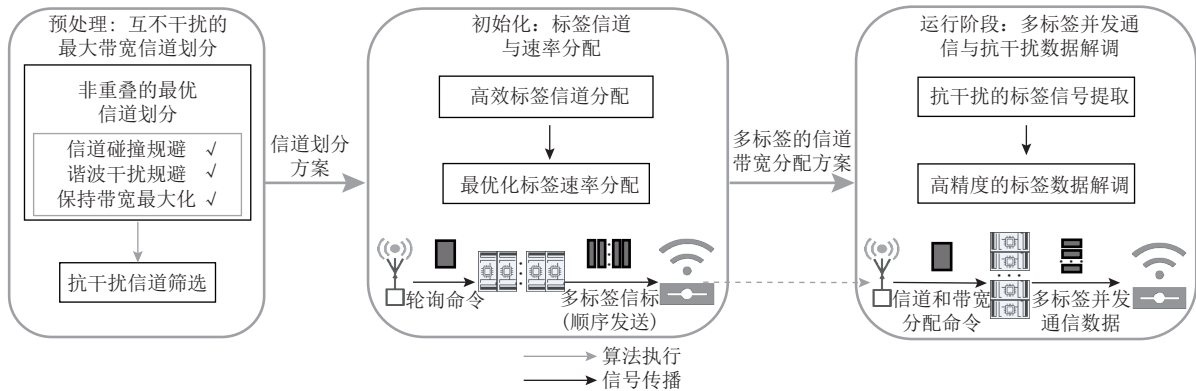


Fig. 3 System overview of CamScatter

图3 CamScatter 系统概况

4 系统设计

本节详细介绍 CamScatter 的3个阶段:第1阶段是进行预处理,得到互不重叠且总带宽最大的信道划分方案;第2阶段是在系统初始化阶段,根据标签

实际的信噪比对每一个标签进行信道、带宽的分配;第3阶段是在系统运行阶段,接收端解调多个标签并发通信的信号.

4.1 带宽最大化的信道划分方案

本节主要介绍如何获得带宽最大化的信道划分方案,最终目的是得到一组带宽划分方案,使得标签

在这些信道通信时,不会因为谐波频谱碰撞而对其他标签造成干扰.在满足互不碰撞的条件下,我们需要实现所有信道的带宽之和最大.

在系统开始运行之前,我们可以获取标签通信的信道中心频率.如图4所示,按照每个中心频率从小到大排列为一个序列 $F = (f_1, f_2, \dots, f_n)$,对应的每个信道的带宽 $B = (W_1, W_2, \dots, W_n)$,此时相邻2个信道的中心频率之间的间距为 $F(i+1) - F(i)$, $i < n$,其中 $F(i)$ 是序列 F 的第 i 个元素.

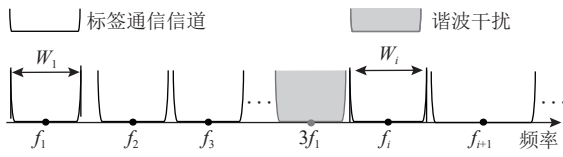


Fig. 4 Channel division schematic diagram

图4 信道划分示意图

1) 给定信道中心频率下的带宽划分方案.在给定的信道方案下,为了防止信道之间的相互碰撞,相邻2个信道的带宽之和的一半不能超过2个信道中心频点之间的距离,即 $(W_i + W_{i+1})/2 \leq F(i+1) - F(i)$.在谐波干扰的情况下(以三次谐波为例),我们需要把谐波干扰处对应的无法使用的频谱也考虑进去,此时我们的方案是把谐波也当作一个信道并加入到 F 之中对序列中的所有元素排序,可以得到一个新的序列: $F_\alpha = (f_1, f_2, \dots, f_{i-1}, 3f_1, 3f_2, f_i, \dots, f_{2n})$,此序列按照频率从高到低进行排序,其中元素的索引用 t 表示,对应的带宽序列 $B = (W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_{2n})$.为了方便之后的表述,我们构建了另一个序列,把谐波和可用信道分开, $F_\beta = (f_1, f_2, \dots, f_n, 3f_1, 3f_2, \dots, 3f_n)$,其中的元素用索引 j 表示,且对于某个标签信号 f_j ,其三次谐波的索引为 $n+j$,即 $F_\beta(j+n) = 3F_\beta(j)$.我们定义函数表示2个序列索引的对应关系, $\phi: \phi(j) = t$.根据式(4)可以看到,高次谐波信号只是在频率上和一次谐波不同,标签数据中每一个比特的持续时间在各次谐波上都是相同的,因此理论上三次谐波信号的带宽和一次谐波带宽相同,因此 $W_\phi = W_{\phi(n+j)}$.

为了使系统中所有信道的带宽之和最大,我们采取了线性规划算法,目标是使得所有标签的通信信道(一次谐波)带宽最大:

$$\begin{aligned} & \max_{\{t|\phi(t) \leq n\}} \left(\sum_t W_t \right), \\ \text{s.t. } & \frac{1}{2}(W_t + W_{t+1}) \leq F_\alpha(t+1) - F_\alpha(t), t = 1, 2, \dots, \phi(n), \\ & W_{\phi(j)} = W_{\phi(n+j)}, j = 1, 2, \dots, n, \\ & L_i \leq W_i \leq U_i, i = 1, 2, \dots, 3n, \end{aligned} \quad (10)$$

其中, L 和 U 分别代表每一个信道带宽的下界和上界,控制带宽上下界可以防止在算法执行的结果中由信道宽度差距过大的情况产生,难以满足实际的需求.

2) 从多个候选信道中选最优方案.在实际运行的过程中,标签的数量往往会小于可以通信的信道数,为了防止有空信道浪费频谱资源,系统会根据当前运行的标签数目来匹配相同的信道数.因此我们的系统需要在所有的移频中选择一部分,来执行上述线性规划算法得到最优的带宽划分方案.但是如何在不同的信道个数下,从所有的移频中选择使系统总带宽最大的组合来构建信道,是我们需要解决的问题.其中最直接的方法是利用深度优先搜索遍历所有的情况来获得,但是按照CamScatter可以使用的移频数目有30个的情况来看,整个系统需要至少有 2^{30} 的搜索次数.于是我们根据信道频谱的分配情况进行了剪枝.我们把所有信道的中心频率分为两类:会产生谐波干扰和不会产生谐波干扰.会产生谐波干扰的信道一般分布在低频部分,会对高频的信道产生干扰.高频信道的谐波已经到了系统可用总带宽范围之外,因此不会对系统中其他标签的信号产生影响.我们会优先选择不会产生谐波干扰的信道,对于这些信道我们执行深度优先搜索算法.在CamScatter,这些信道的数量占比接近1/2,因此针对这些信道,搜索数可以降低到 2^{15} .当我们选定一组这样的信道之后,计算这些信道所占的带宽,由于每一个信道都有自己的带宽上限,选定的信道之间会有空的频谱没有被占用,这些空频谱便可以容纳低频信号的谐波干扰.因此我们对剩余的信道产生的干扰带宽与其自身信道带宽的比值进行排序,按照顺序选出干扰小的信道.把2种类型的信道进行组合,再结合线性规划算法即可得到某一个信道数目之下所有信道互不冲突并且带宽之和最大的信道划分方案.由于此过程是在预处理的过程中执行的,此时系统还没有开始运行,无需考虑算法的实时性问题,我们可以先得到多个信道划分方案,在运行阶段对已有的方案进行筛选.

3) 抗干扰的信道划分方式.系统在实际运行的

过程中,信道之间即使没有冲突,信道里的信号由于频谱泄露以及滤波器等原因会对相邻的信号产生干扰.特别是信噪比强的信道会对信噪比弱的信号产生干扰,导致弱信号无法解调.因此 CamScatter 在得到最优化的信道划分方案的过程中,也会兼顾筛选出分散程度高的带宽组合. CamScatter 是设定一个阈值,筛选出系统最大带宽为此阈值之上的信道分配方案,之后计算每一个方案中相邻信道之间信道边界频率的方差,方差最小的即为排布最分散的方案.我们在实际运行时,会选取其中一部分信道划分方案作为候选项,系统会根据实时收取的标签信号信噪比,计算最适合系统当前运行状态的信道划分方案.

4.2 高效信道分配

在本节我们主要介绍系统在运行过程中的初始化阶段的信道分配算法.目标是根据标签信号的信噪比,把对应的标签分配到合适的信道之中.首先系统需要从多个信道划分方案中,选择出最符合当前所接收的多标签信号强度的一组方案,之后把每一个标签信号分配到合适的信道之中.

为了执行高效的信道分配方案,需要尽可能满足2个条件:第1个条件是,让信噪比高的信号尽量分配到带宽更宽的信道之中,根据式(9),标签可以通过改变自身的速率来改变自身信号的带宽和信噪比,具体而言,标签速率提升,其信噪比会降低,且所占带宽会增加.因此我们可以通过把信噪比高的信号分配到带宽宽的信道之中,这样便可以通过提升此类标签的数据速率来降低其信噪比,从而降低对周围信道中标签信号的干扰,而且信道也有足够的带宽容限支持其以高速率(高信号带宽)通信.第2个条件是,相邻信道标签之间的信噪比不能相差太大,如果一个强信号和弱信号分配在相邻信道之中,即使强信号可以通过提升速率降低信噪比,但是由于式(9)中信噪比所在项和数据速率呈对数关系,因此提升速率降低信噪比的能力也是有限的.

为了满足这2个条件,本文提出了一种高吞吐量的信道分配方案.首先,针对第1个条件,我们首先提出了一种贪心策略,根据信噪比从高到低排序所有的标签,同时根据带宽从大到小排序所有的信道,按照排序后的顺序,将信噪比最高的标签分配给带宽最大的信道,次高的给次大的,以此类推.如果不考虑标签信号之间的相互干扰,我们可以通过反证法证明此策略是最优的:假设存在一种最优解,其中某个信噪比较高的标签被分配到了一个带宽较小的信道,而一个信噪比较低的标签被分配到了带宽较

大的信道.根据香农公式,增加带宽对信噪比较高的标签的容量增益会比对信噪比较低的标签更大.因此,通过将这2个标签互换,我们可以获得更高的总信道容量.这意味着原先的分配不可能是最优的,从而证明了按照信噪比和带宽从高到低进行贪心分配是最优的.在此基础上我们设计了一种高匹配度的信道方案筛选算法,可以从4.1节得到的多个信道划分方案中选出最匹配当前标签信噪比分布情况的划分方案.我们通过计算所收到 n 个标签反射信号的信噪比序列 $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ 和所有的 m 个信道带宽划分方案的带宽构成的矩阵 $\mathbf{B}_{m \times n} = (\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \dots, \mathbf{B}_m)^T$ 的行向量之间的最大余弦相似度来判断标签的信噪比和信道划分方案的相似度.因此我们可以选择相似度最大的行向量 $\mathbf{B}_j$ 作为我们最终选定的信道规划方案:

$$j = \arg \max_{1 \leq k \leq m} \frac{S \cdot \mathbf{B}_k}{\|S\| \cdot \|\mathbf{B}_k\|}, \quad (11)$$

其中 $\|\cdot\|$ 表示向量的L2范数.

针对第2个条件,我们可以从4.1节得到的多个信道划分方案中选取一个最合适的方案,在这样的方案中,高带宽信道和低带宽信道各自聚集在系统频谱的高频和低频两部分.具体操作是,我们把系统的频谱分为高频和低频两部分.一般来说,高频部分会容纳高带宽的信道,低频部分容纳更多的是低带宽信道,于是我们通过计算两部分信道带宽的方差,方差越小的方案,其高、低带宽信道就会更加趋向于聚集在2个不同区域.然而,4.1节中的算法在实际运行过程中,得到的信道划分方案并不一定会满足这样的要求,即使有满足这样要求的方案,也有可能牺牲大量的系统总带宽.为了解决这个问题,我们可以在4.1节的带宽最大化信道划分方案中,改变式(10)中的上界和下界来控制生成信道的方式.具体而言,我们可以提升高频信道的上下界,同时降低低频信道的上下界.这样生成的信道方案会趋向于把高带宽的信道聚集在高频区域、低带宽的信道聚集在低频区域,更容易满足我们需要的第2个条件.

4.3 最优化标签速率分配

在4.2节中,我们给每一个标签 $(t_1, t_2, \dots, t_n)$ 分配到了它们合适的信道 $(f_1, f_2, \dots, f_n)$ 之中.其中每一个信道的最大带宽为 $(W_1, W_2, \dots, W_n)$,每个标签对应的带宽 $(w_1, w_2, \dots, w_n)$ 应当不大于它所在信道的最大带宽,每个标签的数据速率为 $(r_1, r_2, \dots, r_n)$,根据式(9),调整标签的速率可以改变带宽和信噪比.当每一个标签已经得到了其分配的信道进行通信时,我们需要为每一个标签分配合适的通信速率,使系统中每一个

标签在运行时不会因为信噪比差别过大对周围信道的信号产生干扰,同时也可以实现在不会产生相互干扰时最大的系统吞吐量,即实现容量的最大化。

针对这一问题,我们提出了一个带宽扩张算法,它是一种迭代的局部调整策略。首先我们给定一个阈值 T ,当相邻 2 个信道的信噪比之差大于这个阈值之后,强信号会对弱信号产生干扰。具体过程如算法 1 所示。

算法 1. 容量最大化速率分配的带宽扩张算法。

输入: n 个信道的最大带宽 $(W_1, W_2, \dots, W_n)$; 信噪比之差的阈值 T , 每个标签的噪声功率谱密度 N_0 , 每个标签的信号功率谱密度 $(P_1, P_2, \dots, P_n)$ 。

输出: 系统吞吐量最大时, 每个标签的速率 $(r_1, r_2, \dots, r_n)$ 。

① 初始化: 根据式(8)我们可以针对每一个标签 i 计算速率, 使得它们的信噪比 $s_i = \text{lb}\left(\frac{P_i}{N_0 \times r_i}\right)$ 相同, 则可以得到带宽为 $w_i = r_i$, 在此过程中, 需要保证 $w_i \leq W_i$ 。

② 带宽扩张: 对于每个标签 i , 从其初始带宽 $w_i = r_i$ 开始, 逐步增加其速率(扩大其带宽)。

③ 停止扩张条件 1: 如果对于某一个标签, 其带宽 $w_i = W_i$, 则此标签的带宽停止扩张, 其对应的速率 $r_i = W_i$ 。

④ 停止扩张条件 2: 如果对于某一个标签, 其信噪比 s_i 和相邻的标签(假设为标签 $i-1$)的信噪比 s_{i-1} 相差 T , 则停止该标签的带宽扩张。此时该标签的速率 $r_i = 2^{s_{i-1}-T} \times N_0 / P_{i-1}$ 。

⑤ 算法结束条件: 如果所有的标签都停止带宽扩张时, 算法结束。

下面是对算法 1 最优性的证明, 我们采用反证法的方式: 假设存在一个更优解, 即存在另一种配置使得系统中所有标签的速率之和更大, 即至少有 1 个标签的速率设置比算法 1 中的速率设置要大, 即 $r'_i > r_i$ 。如果该标签的速率设置在算法 1 中是根据停止扩张条件 1 得到的, 则说明更优解的 $w'_i > W_i$, 此时标签的带宽超过了信道可以承受的最大带宽范围, 会由于频谱碰撞对其他标签信号产生干扰。如果该标签的速率设置在算法 1 中是根据停止扩张条件 2 得到的, 即相邻信道中标签信号的信噪比和当前标签的信噪比相差 T 。如果相邻信道的标签(假设为标签 $i-1$)的速率是由于停止条件 1 得到的, 则 $s_{i-1} - s'_i > T$, 周围信道的信号会对其造成干扰。如果标签 $i-1$ 是由于停止条件 2 得到的, 这会使得 $s'_{i-1} < s_{i-1}$, 为了满足不相互干扰的条件, 则更优解中 $i-1$ 周围的标

签信号强度也会比算法 1 得到的结果要弱, 以此类推, 直至有 1 个标签 t , 它周围标签(假设为 $t-1$)由于停止条件 1 得到的, 则 $s'_{t-1} - s'_t > T$ 。根据我们的算法过程, 必有 1 个标签是根据停止条件 1 得到的, 否则所有标签的带宽会一直扩张。

4.4 多标签并发信号解调

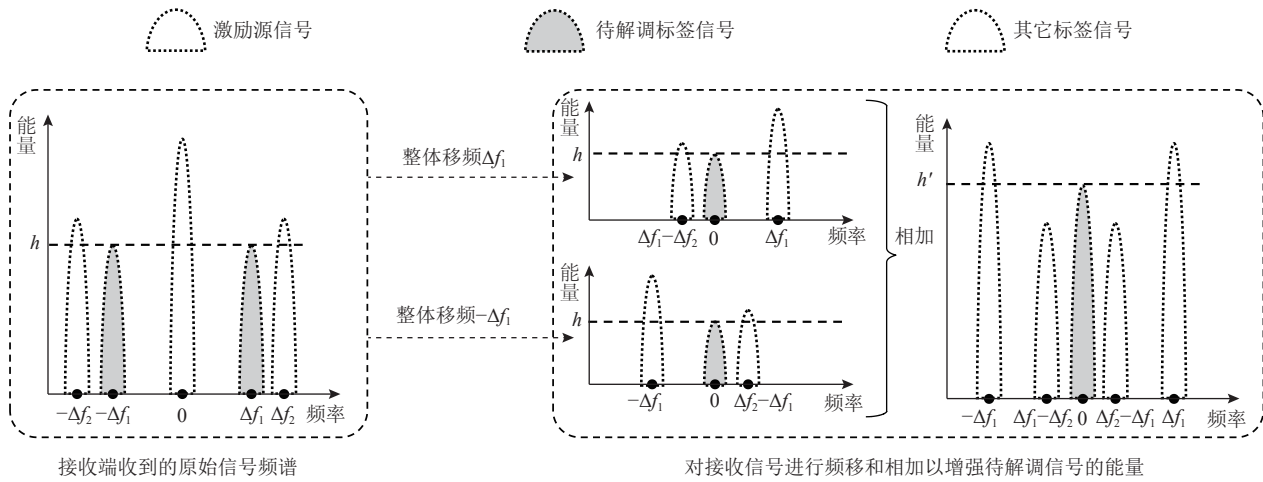
接收端在解调多个标签的反射信号时, 需要解决多个标签信号之间的相互干扰。反射信号的功率通常比激励信号的功率弱几个数量级, 周围的标签信号产生的干扰会使得接收端难以获取当前信道标签准确的幅值信息, 极易发生解调错误。于是, 本节针对标签信号的解调, 设计了一种抗干扰的多标签信号解调策略, 来提升多标签并发系统的通信性能。

1) 抗干扰的标签信号提取。根据式(5)可知, 标签信号会有正向偏移和负向偏移 2 种信号频率。之前的工作在解调时, 只会用到其中的一个偏移, 另一个偏移往往被舍弃, 这就导致了标签信号的能量只有一半是被用作解调的, 造成了资源的浪费。本文提出了一种频谱聚合的方式, 如图 5 所示, 它可以把 2 部分的频谱资源都利用起来, 提升待解调标签信号的信噪比。具体过程是先对待解调标签的信号的两个边带信号进行移频, 将它移频到 0 号频率点。具体的过程类似于式(5), 是在待解调标签的 2 个频率偏移上分别乘以一个与其移频相反的正弦信号使原来的移频信号可以集中到 0 号频率。以信号 $\cos(2\pi(f_c + \Delta f)t)$ 为例, 我们将其乘以一个频率为 Δf 复指数函数 $e^{j2\pi\Delta ft}$ 得到:

$$\begin{aligned} y_{s+}(t) &= \cos(2\pi(f_c + \Delta f)t) \cdot e^{j2\pi\Delta ft} = \\ &= \cos(2\pi(f_c + \Delta f)t) \cdot (\cos(2\pi\Delta ft) + j\sin(2\pi\Delta ft)) = \\ &= \frac{1}{2} [\cos(2\pi(f_c + 2\Delta f)t) + \cos(2\pi f_c t)] + \\ &+ j \cdot \frac{1}{2} [\sin(2\pi(f_c + 2\Delta f)t) + \sin(2\pi f_c t)]. \end{aligned} \quad (12)$$

我们可以通过低通滤波的方式得到其中频率为 f_c 的分量, 对于信号 $\cos(2\pi(f_c - \Delta f)t)$ 亦是如此。之后再 把 2 个分量移频后的信号相加, 得到经过增强后的待解调标签的信号。

2) 高精度的标签信号解调。带通滤波结束之后会得到标签信号的大致波形, 由于标签使用的是 OOK 调制, 其信号中的波谷和波峰分别可以代表数据“0”和数据“1”。但是想要精确解调标签数据还存在 2 个问题: 首先是由于标签的反射信号很弱, 接收端很难设定一个确定的阈值来判决标签信号当前的数据比特; 其次是由于标签信号中每一个数据比特持续的采样点数是不固定的, 接收端无法确定每一



注：图中忽略了频率区间 $[-\Delta f_1, \Delta f_1]$ 之外的信号， h 表示待解调标签信号的能量， h' 表示增强后该标签的信号能量。

Fig. 5 Anti-interference tag signal extraction

图5 抗干扰的标签信号提取

个数据比特所占的采样点数。针对第1个挑战，我们采用了匹配滤波的方案，把接收信号与一串对应于其调制方案的符号序列（OOK 信号是一串全1的序列）与原始信号互相关。这样得到的信号的数据比特幅值的差异就会变大，很容易通过阈值的方法进行区分。在解调的过程中，我们也可以利用 STABack^[13] 中提到的方法，利用滑动窗口的方式动态确定阈值。为了解决第2个挑战，我们引入了符号同步^[35]的方式，在标签信号的起始设置同步字，在我们的系统中设置同步字为16比特“10”交错的序列，这个同步字可以帮助符号同步模块快速确定每一个标签信号比特所占的采样点数，保证了后续对反射信号采样判决的正确性。

5 实验评估

本节首先介绍我们的实验部署，包括标签设计、激励源和接收端的选型；之后对 CamScatter 算法进行了详细的评估；最后在不同场景实际部署了我们的系统并进行了详尽的测试。

5.1 实验部署

1) 标签设计。我们基于 TI MSP430FR5969 微处理器设计了如图6所示的反向散射标签。反向散射标签的天线由 ADG902 RF 开关控制，微处理器决定何时以及如何反向散射激励信号，同时也可以解析激励源的命令，控制标签以不同的状态工作，修改标签信号的信道和速率，经实际运行测量，整个反射标签的平均运行功耗为 $67.77 \mu\text{W}$ 。我们设置标签 MCU 频率为 16 MHz，并采用文献[7]中的实现方式选出了30个

频点，这些频点的最高频率为 728 kHz，最低频率为 147 kHz。根据 4.2 节中的设计原则，本文设置高于 300 kHz 频率的信道的带宽上界为其频点频率的 1/8，即选择 8 个周期的方波信号作为 1 个数据比特，低于此频率的信道带宽上界设置为频点频率的 1/16，所有信道的带宽下界设置为 1 kHz。在实际实验中，我们可以把多个反射通信标签集成到 1 个亚克力板上作为我们实验评估的系统。

2) 激励源。我们将 NI USRP N2944R 软件无线电平台链接一个增益为 3 dBi 的定向天线用作射频源，用 GnuRadio 控制。在系统运行的过程中，我们配置激励源产生 $f_c = 915 \text{ MHz}$ 的载波，同时利用一个 30dB 增益的功率放大器提升激励信号的功率。

3) 接收端。我们利用 NI PXIe-5646R 软件无线电设备作为接收端来接收系统中多个标签的信号，使用 LabView 控制并接收信号，利用 Matlab 处理接收后的信号来执行信道、速率分配与解调算法。

在接下来的实验评估过程中，我们首先评估 4.1 节介绍的信道划分算法；之后评估信道分配算法的性能以及抗干扰能力；最后评估速率分配算法的性能以及确定参数 T 的合理取值范围。

5.2 信道划分算法评估

首先，我们对信道划分算法的性能进行了评估。为了进行比较测试，我们实现了 2 种算法：一种是基于贪心策略的信道扩张算法，另一种是频谱最大分散的信道划分方案。我们的系统通过这 2 种算法进行了比较评估。此外，我们还计算了在先前研究中通过牺牲频谱利用率来解决谐波干扰所产生的带宽，并将其与我们的信道划分算法进行了对比。首先我们



Fig. 6 System devices and implementation

图6 系统设备和部署

介绍对应算法的实现方式:

1) 带宽扩张算法. 所有信道从其中中心频率开始往外扩充带宽, 如果发生了2个信道碰撞或者谐波信号与一个标签信道碰撞, 则淘汰其中频率较小的信号(因为频率较大的信号可以达到的速率上限更大, 同时谐波干扰均产生于低频信号), 最终直至剩余标签数量和我们需求的数量一致则不再淘汰, 所有标签的带宽扩充至与相邻信道刚好不产生碰撞, 则停止算法执行.

2) 分散度最高筛选算法. 由于相邻信道之间的标签会相互干扰, 我们可以选择在频谱上分布尽量分散的频点作为我们的候选频点, 再结合4.1节介绍的线性规划算法计算这些候选频点的最优带宽分配方案. 我们通过循环计算最大距离的方式筛选得到最分散信道. 具体过程为: 选择所有候选信道中最大的频点加入到集合 X 中, 之后计算得到剩余候选频点中与 X 中所有点的距离之和最大的频点, 将其加入到 X 中, 循环这个过程, 直到 X 中元素个数达到需求.

3) 谐波消除算法. 此算法根据2.3节中所述, 利用模拟正弦波的方式消除了谐波干扰. 这一方法虽然不需要考虑谐波干扰, 但需要用4倍信号周期来实现, 这大大牺牲了反射通信系统中有限的频谱空间, 限制了系统容量的提升.

我们的实验结果如图7所示, 可以看到, 本文提出的信道划分算法得到的带宽在11个标签并发通信的时候可以达到其他算法的1.5倍, 同时本文的算法在信道数3~28时得到的系统带宽都会优于其他算法, 这说明本文提出的最优带宽分配方案可以有效地解决在反射通信场景中有限的频率资源的利用问题. 当信道数为12时系统可以达到最大的带宽占用量

485 kHz, 同时本系统可以利用的最大带宽为635.7 kHz, 因此可以实现76.3%的频谱利用效率. 理论上, 没有谐波干扰的最大可用带宽为515.67 kHz, 最大频谱利用效率为81.1%. 而且, 如果在我们的系统中所有标签可以占满可用的带宽, 每个标签的信噪比为17 dB, 在不受干扰的情况下, 系统总容量可达 $515.67 \times 10^3 \times \lg(1 + 10^{17/10}) = 2\,925$ kbps. 实验结果显示, 最远距离算法和带宽扩张算法依然可以比谐波消除的方式实现更高的带宽, 因此进行信道划分的方式会比谐波消除的方式更能扩大有限带宽下的系统容量.

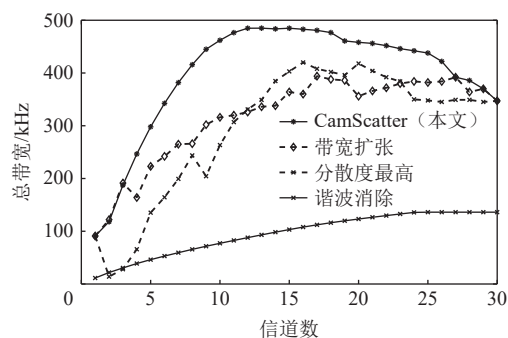


Fig. 7 Performance comparison of channel division schemes

图7 信道划分方案性能比较

5.3 标签信道与速率分配算法评估

对于本文提出的信道分配的算法, 我们通过仿真实验进行了评估. 实验通过比较不同分配方式的误码率(bit error rate, BER)差异来验证本文提及的信道分配算法对于多标签并发的系统中解决标签之间相互干扰的能力. 其中, 实验用到的信道划分方案是根据4.1节中提及的算法生成的, 并根据4.4节中的抗干扰信号、高精度数据解调方案解调反射标的数据. 我们模拟了并发通信的标签数3~30个的过程, 生

成了信噪比在 17~37 dB 的反射信号, 并通过调整数据速率使得每个反射信号占满对其分配的带宽. 对每个标签数目, 我们进行了 100 次仿真实验评估, 并计算当前并发数目下所有标签的误码率平均值. 我们把本文的分配算法与 2 种分配方式进行比较. 第 1 种是不分配信道的方式, 每个信道安放随机信噪比的信号, 第 2 种是带宽最大的信道分配方法, 即从所有候选的带宽划分方案中选取带宽之和最大的一组方案并利用贪心策略分配, 本文的方法选择的是带宽之和较大并且和当前所有标签信噪比匹配度最高的信道分配方案, 并利用贪心策略分配.

图 8 展示了我们的信道调度算法的评估结果, 可以看到, 如果不用本文提出的分配方案, 所有标签信号的误码率在并发通信的标签数大于 5 时会达到 0.1 以上, 最高可达 0.17; 应用了带宽最大的信道分配方案之后, 误码率有了明显的降低, 但仍然有很多标签数下的误码率达到 0.11 以上; 应用了本文 4.2 节中基于匹配度最高的分配算法之后, 标签的误码率有了一定程度的降低, 在大多数情况下误码率可以达到 0.11 以下. 这取决于我们的算法可以根据标签的信噪比来分配合适的信道, 并保证了高信噪比的标签和低信噪比标签各自集中在频谱的两端. 同时, 该分配算法也可以根据标签的信噪比分布情况, 来从多个信道划分方案中选取与当前的信噪比分布余弦相似度最高的方案进行分配, 也增强了标签与信道之间的匹配度, 降低了由于信噪比与信道带宽不合适造成的带外干扰.

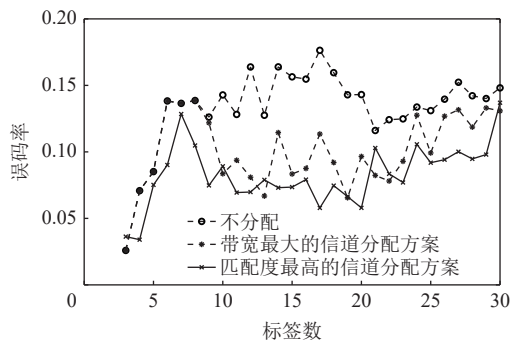


Fig. 8 BERs comparison of channel allocation algorithms

图 8 信道分配算法的误码率对比

为了评估在结合了本文提出的最优化速率分配方案之后系统性能的提升, 我们采用了与信道分配方案相同的仿真方式, 根据 Spray^[7] 中的实验结果设置阈值 $T=3$ dB, 每个标签的信噪比为 17 dB. 我们比较了本文的信道和速率分配算法与前文提到的最高分散度算法、带宽扩张算法以及基于搜索的低干扰

算法在误码率和系统吞吐量上进行了比较. 其中, 基于搜索的低干扰算法的主要思想是先根据标签的信噪比在接收端中搜索每个标签合适的速率, 并模拟生成一小段对应的信号进行预解调, 直至寻找到误码率低于某个阈值的速率组合, 实验中误码率阈值我们设定为 0.01. 具体的预解调过程为: 首先让每一个标签的信号带宽占满其所在的信道带宽, 如果某个标签的误码率没有达到阈值则用折半查找的方式调整其标签信号的带宽, 找到满足要求的速率组合. 这种方法可以减少远近效应造成的标签之间能量强度变化大导致的标签信号相互干扰的问题. 图 9 显示了利用不同分配算法的误码率, 可以看到, 利用了本文的算法 CamScatter, 多个标签并发时的误码率得到了显著降低, 在大多数情况下可以达到 0.02 以下, 在标签数超过 20 个时, CamScatter 比基于搜索的算法误码率要低, 因为随着标签数目的增多, 标签之间的相互干扰变得复杂, 仅通过少量次数的搜索难以找到一个性能最优的分配方法. 而这表明了我们的速率分配算法可以最大程度上避免标签之间的相互干扰, 保证多个标签并发通信的顺利进行. 而分散度最高和带宽扩张的算法, 当标签数大于 10 时, 会因为远近效应的原因, 相邻信道中强信号会对弱信号产生剧烈干扰, 因此系统的误码率均会变得较高.

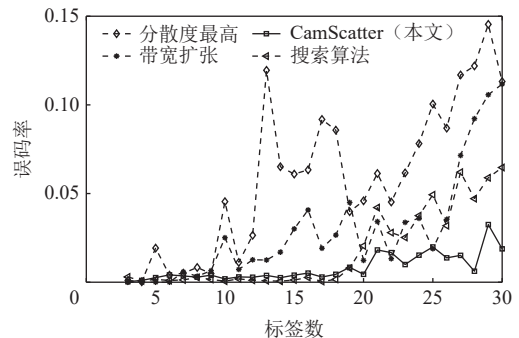


Fig. 9 Comparison of BERs of different allocation algorithms

图 9 不同分配算法的误码率对比

为了验证本文提出算法在容量方面的提升, 我们进行了对比实验来比较在不同标签数下系统可以达到的总容量. 对于每一个标签数我们按照式 (7) 计算每一个标签的信道容量, 其中把其他标签的干扰看作噪声, 求和得到系统的总容量, 结果如图 10 所示. 可以看到, 当标签数在 6~19 时, 系统总容量可以达到 1600 以上, 大多数标签并发的情况下, 本文的信道和速率分配算法可以比其他算法实现更高吞吐量, 在标签数为 11 个时, 系统的总容量可以达到 1914 kbps, 是理论值的 65.4%, 这是由于标签会有频谱泄露, 本文

实际计算信噪比的时候把频谱泄露的干扰作为噪声。同时虽然在标签数大于 20 时, CamScatter 的性能不会有太大优势, 因为其他算法的分配方案大致和本文的分配方案类似, 但是 CamScatter 可以保证系统在低误码率下运行。对于搜索算法, 其考虑的是尽量保证所有标签的能量相同以减少相互干扰, 因此所有的标签信号速率都会受到最弱信号的影响, 当标签数大于 13 时, 所有标签的带宽都因为最低能量标签的限制, 只能达到系统设定的下限。对于带宽扩张算法和分散度最高算法, 它们在标签数大于 10 时会和 CamScatter 在系统容量方面有较大差距, 这是由于这 2 种算法由于没有考虑如何最大化频谱的利用率, 仅仅是一种局部最优的策略, 保证系统尽量免受干扰。

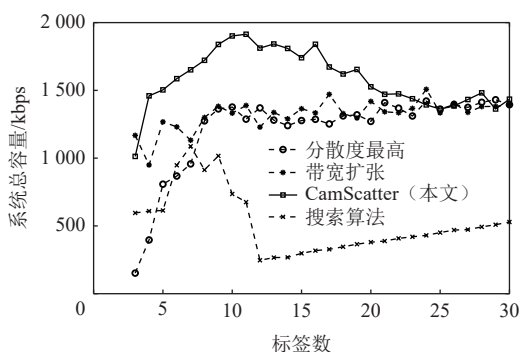


Fig. 10 Comparison of system capacities of different allocation algorithms

图 10 不同分配算法的系统容量对比

我们还进行了不同算法之间吞吐量的对比实验, 设置标签的信噪比为 17~37 dB。实验结果如图 11 所示, 可以看到, 当标签数低于 10 时, 所有算法的吞吐量都是随着标签数的增多而增大的, 这是由于在标签数少的时候相互之间干扰很少, 随着标签数变多, 相互之间的干扰越来越大, 利用每一种算法进行通信的吞吐量都会有所下降。

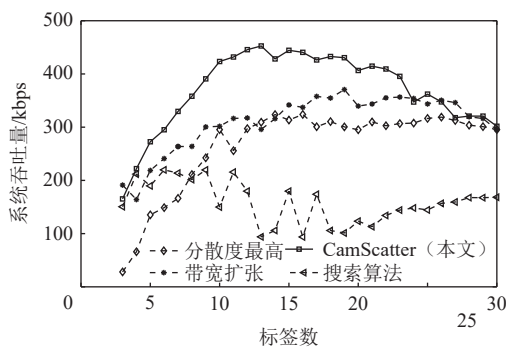


Fig. 11 System throughput comparison of different allocation algorithms

图 11 不同分配算法的系统吞吐量对比

对于带宽扩张算法和分散度最高算法来说, 它们的吞吐量在标签数大于 13 时便开始保持恒定, 因为这 2 种算法随着标签数的增多, 它们可以选择的信道带宽就越窄, 添加一个窄带信道往往只会增加一点点系统的带宽, 但付出的代价是对其他标签的信号造成了更多的干扰, 造成更大的吞吐量损失。对于本文提出的信道和速率分配算法, 当标签数达到 12 个时可以达到系统的最大吞吐量为 483.5 kbps, 是带宽扩张算法的 1.52 倍, 当标签数大于 19 个时系统的吞吐量开始下降, 越来越接近其他算法, 但是本文算法具有低误码率的优势, 能够抵抗标签之间的干扰。搜索算法虽然保证了系统中的每个标签在没有干扰的情况下通信, 但是没有考虑在无干扰条件下如何保证系统吞吐量最大, 许多标签还可以在不造成干扰的情况下以更高的速率通信。从图 11 的实验结果可以看到, CamScatter 算法在标签数大于 5 时, 吞吐量远超搜索算法, 最高达到其吞吐量的 5.19 倍。

5.4 实际场景性能测试

我们分别在室内和走廊 2 种场景中布置了多个反射通信标签, 以测试并发反射通信系统的最优性能。与 OFDMA 反射通信类似, 我们放置激励源与反射通信标签的距离约 1 m, 并在距离标签约 5 m 处接收反射信号。系统利用本文提出的信道划分、信道和速率分配策略根据反射标签的信噪比为其分配最合适的信道。之后通过收集每个位置的反射标签数据将其组合得到多个标签并发通信的信号, 并利用抗干扰的信号解调方法来对多个标签的数据进行解调, 同时计算了在每个并发数目之下所有标签的误码率和系统吞吐量, 实验结果如图 12 和图 13 所示。从图 12 可以看到, 随着标签数的增多, 标签的误码率会呈现增高的趋势, 但是一直保持在 0.1 以下, 维持着低相互干扰水平。室内的误码率会比走廊环境更高, 这主

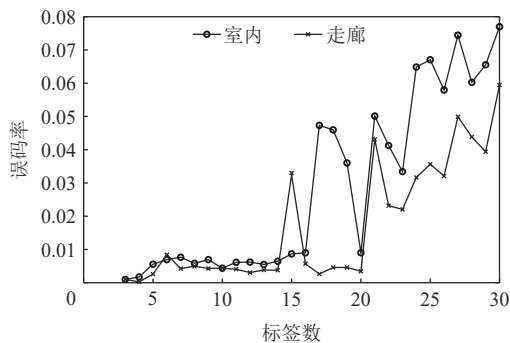


Fig. 12 Change of BERs with different numbers of tag in two scenarios

图 12 2 种场景下的标签误码率随标签数的变化

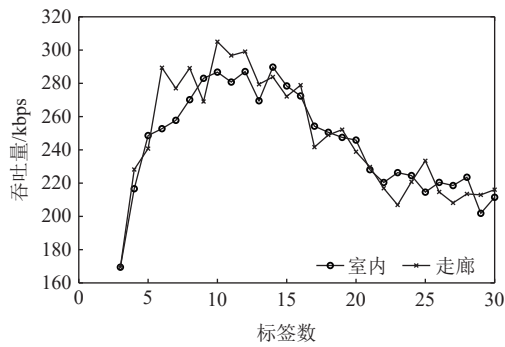


Fig. 13 Change of throughputs with different numbers of tag in two scannerios

图 13 2 种场景下的标签吞吐量随标签数的变化

要是因为室内会有各种障碍物,它们不但会阻碍信号的传输,而且会反射标签发送的信号,产生多径效应,对其他标签的信号产生额外的干扰,走廊里的空旷环境产生的影响会比室内少许多.由图 13 所示,在室内工作时系统的吞吐量可以达到 289 kbps,在走廊工作时系统的吞吐量最高可以达到 305 kbps.从整体的系统吞吐量趋势来看,不论是在走廊还是在室内,吞吐量相差不大,这是因为标签之间的相互干扰对通信性能的影响会强于环境干扰.标签不同的摆放位置会对应不同的信道、速率分配方式,因此在不同环境下系统的吞吐量会有一定的差异.

5.5 与其他相关工作的性能比较

表 1 展示了本文的系统与相关的并发反射通信工作的对比,在有限的频谱资源下(617 kHz),本文工作可以实现 30 个标签的并发通信,吞吐量可以达到 305 kbps,单个标签的吞吐量可以实现 1~91 kbps 灵活多变的调整,适应更多场景的需求.同时本文的工作可以解决由于谐波和远近效应造成的标签之间的相互干扰,基于 MCU 的实现方式可以大大降低标签的功耗,实现无源通信.对于 OFDMA 反射通信^[15]来说,由于其子载波本身的高带宽需求,难以在有限的频谱资源下支持高并发量;对于 NetScatter^[14]和 P²LoRa^[16]来说,由于其利用线性扩频调制方式,本身需要占用大量的频谱资源在信号调制之上,使得标签的吞吐量低,

Table 1 Main Performance Comparison with That of Related Works

表 1 与相关工作的主要性能对比

系统	同带宽并发数	总吞吐量/kbps	单标签吞吐量/kbps	谐波规避	解决远近效应	功耗
OFDMA	2	500	250	×	√	>1 mW
NetScatter	256	220	0.97	×	×	>1 mW
P ² LoRa	101	11.27	0.11	×	×	320 μW
本文	30	305	1~91	√	√	68 μW

难以实现比如视频、音频传输的需求.同时,OFDMA 反射通信和 NetScatter 的工作需要高功耗的 FPGA 设备来实现精准的移频,难以实现反射标签的无源工作.相比之下,本文系统可以在有限的频谱资源之下实现较大规模的反射通信以及高系统吞吐量,同时系统中的低功耗反射标签可以支持灵活的速率设置,以及可以支持多种类型的设备并发通信,适用于如智能家居、智能驾驶和智能穿戴等多种类型传感器协同工作的场景.同时本文提出的抗干扰算法也可以应用到其他系统中,提升系统在实际部署中的性能.

6 总结与展望

本文提出了一种容量最大化的多标签并发反射通信系统 CamScatter,通过优化有限频谱资源的信道划分和分配策略,避免标签之间的干扰,最大化系统吞吐量.通过带宽最大化的信道划分算法和优化的信道及速率分配方案,系统在不同阶段实现了频谱资源的高效利用,最终保证了系统中的标签互不干扰且维持高吞吐量运行.仿真实验表明,该系统可以实现 78.6% 的频谱利用率和最高 1 914 kbps 的系统总容量.实际部署实验验证,系统最高支持 305 kbps 的吞吐量和 30 个标签的并发,有效解决了标签之间相互干扰的问题.

进一步研究将着重于提升系统的适应性和扩展性,以应对更复杂的应用场景和更大规模的设备需求.比如现在系统还局限在使用软件无线电设备发送和接收信号,并用离线的方式对多标签的并发信号进行处理.在未来如何将本文系统和商用设备或者低成本的软件无线电设备相结合来提升系统的可扩展性和易用性还需要进一步研究.同时,本文系统只是实现了 30 个标签的并发通信,对于一些工业场景下的密集物联网设备的信号读取与控制仍然需要设计优秀的调度策略或者支持更多标签通信的并发方式.之后我们将通过不断优化信道分配策略和提升干扰抑制技术,期待该系统能在更广泛的物联网应用中发挥更大的作用.

作者贡献声明:李向阳提出了论文架构、算法思路、指导意见,并修改论文;王山岳提出了部分算法思路和负责完成实验和撰写论文;张弛提出部分算法思路和证明;闫宇博指导系统平台和实验设计,并修改论文;谈海生提出研究问题,指导算法设计并修改论文.

参 考 文 献

- [1] Muratkar T S, Bhurane A, Kothari A. Battery-less Internet of things –A survey[J]. *Computer Networks*, 2020, 180: 107385
- [2] Van Huynh N, Hoang D T, Lu Xiao, et al. Ambient backscatter communications: A contemporary survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 2889–2922
- [3] Rostami M, Sundaresan K, Chai E, et al. Redefining passive in backscattering with commodity devices[C]//Proc of the 26th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2020: 1–13
- [4] Li Songfan, Zhang Chong, Song Yihang, et al. Internet-of-microchips: Direct radio-to-bus communication with SPI backscatter[C]//Proc of the 26th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2020: 1–14
- [5] Chakraborty T, Shi H, Kapetanovic Z, et al. Whisper: IoT in the TV white space spectrum[J]. *GetMobile: Mobile Computing and Communications*, 2023, 26(4): 32–35
- [6] Peng Yao, Shanguan Longfei, Hu Yue, et al. PLoRa: A passive long-range data network from ambient LoRa transmissions[C]//Proc of the 2018 Conf of the ACM Special Interest Group on Data Communication. New York: ACM, 2018: 147–160
- [7] Wang Shanyue, Yan Yubo, Chen Yujie, et al. Spray: A spectrum-efficient and agile concurrent backscatter system[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2024, 20(2): 1–21
- [8] Bharadia D, Joshi K R, Kotaru M, et al. BackFi: High throughput WiFi backscatter[C]//Proc of the 2015 ACM Conf on Special Interest Group on Data Communication. New York: ACM, 2015: 283–296
- [9] Katanbaf M, Saffari A, Smith J R. MultiScatter: Multistatic backscatter networking for battery-free sensors[C]//Proc of the 19th ACM Conf on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2021: 69–83
- [10] Ding Yuxin, Wang Shanyue, Mao Yachen, et al. VideoBack: High quality video backscatter with ambient WiFi[C]//Proc of 2023 IEEE 29th Int Conf on Parallel and Distributed Systems (ICPADS). Piscataway, NJ: IEEE, 2023: 1991–1998
- [11] Yang Lei, Chen Yekui, Li Xiangyang, et al. Tagoram: Real-time tracking of mobile RFID tags to high precision using COTS devices[C]//Proc of the 20th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2014: 237–248
- [12] Yang Zhijian, Choudhury R R. Personalizing head related transfer functions for earables[C]//Proc of the 2021 ACM SIGCOMM Conf. New York: ACM, 2021: 137–150
- [13] Mao Yachen, Yang Panlong, Wang Shanyue, et al. STABack: Making dynamic backscattering stable for fast and accurate object tracking[C]//Proc of 2023 IEEE/ACM 31st Int Symp on Quality of Service (IWQoS). Piscataway, NJ: IEEE, 2023: 1–10
- [14] Hesar 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
- [15] Zhao Renjie, Zhu Fengyuan, Feng Yuda, et al. OFDMA-enabled Wi-Fi backscatter[C]//Proc of the 25th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2019: 1–15
- [16] 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
- [17] Talla V, Hesar 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
- [18] Kellogg B, Parks A, Gollakota S, et al. Wi-fi backscatter: Internet connectivity for RF-powered devices[C]//Proc of the 2014 ACM Conf on SIGCOMM. New York: ACM, 2014: 607–618
- [19] Zhang Pengyu, Bharadia D, Joshi K, et al. HitchHike: Practical backscatter using commodity WiFi[C]//Proc of the 14th ACM Conf on Embedded Network Sensor Systems CD-ROM. New York: ACM, 2016: 259–271
- [20] 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
- [21] Chi Zicheng, Liu Xin, Wang Wei, et al. Leveraging ambient LTE traffic for ubiquitous passive communication[C]//Proc of the Annual Conf of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication. New York: ACM, 2020: 172–185
- [22] Mazaheri M H, Chen A, Abari O. mmTag: A millimeter wave backscatter network[C]//Proc of the 2021 ACM SIGCOMM Conf. New York: ACM, 2021: 463–474
- [23] Liu Xin, Chi Zicheng, Wang Wei, et al. VMscatter: A versatile MIMO backscatter[C]//Proc of the 17th USENIX Symp on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'20). Berkeley, CA: USENIX Association, 2020: 895–909
- [24] Varshney A, Harms O, Pérez-Penichet C, et al. LoRea: A backscatter architecture that achieves a long communication range[C]//Proc of the 15th ACM Conf on Embedded Network Sensor Systems. New York: ACM, 2017: 1–14
- [25] Katanbaf M, Jain V, Smith J R. Relacks: Reliable backscatter communication in indoor environments[J]. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 2020, 4(2): 1–24
- [26] Galisteo A, Varshney A, Giustiniano D. Two to tango: Hybrid light and backscatter networks for next billion devices[C]//Proc of the 18th Int Conf on Mobile Systems, Applications, and Services. New York: ACM, 2020: 80–93
- [27] Zhang Junbo, Soltanaghai E, Balanuta A, et al. PLatter: On the feasibility of building-scale power line backscatter[J]. *GetMobile: Mobile Computing and Communications*, 2022, 26(4): 19–22
- [28] Zhu Fengyuan, Feng Yuda, Li Qianrui, et al. DigiScatter: Efficiently prototyping large-scale OFDMA backscatter networks[C]//Proc of the 18th Int Conf on Mobile Systems, Applications, and Services. New York: ACM, 2020: 42–53
- [29] Wang Shanyue, Yan Yubo, Han Feiyu, et al. MultiRider: Enabling multi-tag concurrent OFDM backscatter by taming in-band interference[C]//Proc of the 22nd Annual Int Conf on Mobile Systems, Applications and Services. New York: ACM, 2024: 292–303
- [30] Chen Yujie, Ding Yuxin, Wang Shanyue, et al. WiB-MAC: Collision-

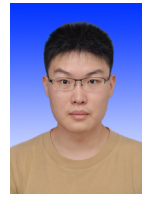
avoidance multiple access for Wi-Fi backscatter networks[C]//Proc of 2024 IEEE/ACM 32nd Int Symp on Quality of Service (IWQoS). Piscataway, NJ: IEEE, 2024: 1–10

- [31] Yen C C, Gutierrez A E, Veeramani D, et al. Radar cross-section analysis of backscattering RFID tags[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2007, 6: 279–281
- [32] Nikitin P V, Rao K V S, Martinez R D. Differential RCS of RFID tag[J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(8): 431–432
- [33] Dehbashi F, Abedi A, Brecht T, et al. Verification: Can wifi backscatter replace RFID?[C]//Proc of the 27th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2021: 97–107
- [34] Abedi A, Dehbashi F, Mazaheri M H, et al. WiTAG: Seamless WiFi backscatter communication[C]//Proc of the Annual Conf of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication. New York: ACM, 2020: 240–252
- [35] Proakis J G, Salehi M. Digital Communications[M]. 5th ed. Boston: McGraw-Hill, 2008



Li Xiangyang, born in 1971. PhD, professor. IEEE fellow and ACM fellow. His main research interests include artificial intelligence of things (AIoT), and privacy and security of AIoT, and data sharing and trading.

李向阳, 1971年生. 博士, 教授. IEEE会士、ACM会士. 主要研究方向为人工智能物联网(AIoT)、AIoT的隐私和安全以及数据共享和交易.



Wang Shanyue, born in 1998. PhD candidate. His main research interests include low-power Internet of things and passive backscatter communication.

王山岳, 1998年生. 博士研究生. 主要研究方向为低功耗物联网、无源反射通信.



Zhang Chi, born in 1995. PhD, associate professor. His main research interests include edge computing and network algorithms.

张弛, 1995年生. 博士, 副教授. 主要研究方向为边缘计算、网络算法.



Yan Yubo, born in 1985. PhD, associate professor. His current research interests include Internet of things, wireless networks, intelligent sensing, and mobile computing.

闫宇博, 1985年生. 博士, 副教授. 主要研究方向为物联网、无线网络、智能感知、移动计算.



Tan Haisheng, born in 1981. PhD, professor. Member of CCF. His main research interests include edge intelligence, and system and networking for AI.

谈海生, 1981年生. 博士, 教授. CCF会员. 主要研究方向为边缘智能、人工智能系统与网络.