

基于大规模天线的无线供能通信 原型系统设计和实现

车越岭, 李梁柱, 曾志豪, 罗 胜, 伍楷舜

(深圳大学计算机与软件学院, 广东深圳 518060)

摘要: 无线供能通信技术是未来 6G 时代支撑能量可持续无线通信的关键技术. 本文首次提出了完整的基于大规模天线的无线供能通信系统的原型设计, 并在软件定义无线电平台上实现了由 32 发射天线基站端、用户端和反馈链路组成的原型系统. 在基站端, 通过设计灵活的帧结构, 原创性地提出了无线能量动态传输方案, 实现了原型系统在信道估计准确性与无线能量传输效率之间的性能平衡. 在用户端, 通过建立实际的非线性能量采集模型和能耗模型, 提出了新颖的用户端信息-能量双阈值电池管理方案, 以满足不同的信息和能量传输需求. 基于用户端状态信息的快速反馈, 本文建立了闭环控制的无线能量和信息自适应传输系统框架. 丰富的室内和室外实验验证了无线供能通信原型系统良好的无线环境适应性和传输性能.

关键词: 无线供能通信; 原型系统设计和实现; 大规模天线; 无线能量动态传输; 无线能量和信息自适应传输

基金项目: 国家自然科学基金(No.62072314); 广东省自然科学基金(No.2023A1515011327)

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)12-3397-13

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20230054

Prototype Design and Implementation for Large-Scale Antenna Based Wireless Powered Communication System

CHE Yue-ling, LI Liang-zhu, ZENG Zhi-hao, LUO Sheng, WU Kai-shun

(College of Computer Science and Software Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract: The wireless powered communication is a key technology to support energy sustainable wireless communications in the future 6G era. For the first time, this paper proposes a complete prototype design for the large-scale antenna based wireless powered communication system, and realizes this prototype system, which consists of a base station with a 32-transmit-antenna array, a user equipment and a feedback link, on the software defined radio platforms. At the base station, by designing flexible frame structures, this paper originally proposes a dynamic wireless energy transmission scheme to properly balance the required channel estimation accuracy and the wireless energy transmission efficiency. At the user equipment, by applying the practical non-linear energy harvesting and energy consumption models, this paper proposes a novel information-energy double threshold based battery management scheme to meet the requirements of different information and energy transmission. Based on the prompt status feedback from the user equipment, this paper completes a close-loop controlled system framework for adaptive wireless information and energy transmissions. Extensive experiments for both indoor and outdoor scenarios are implemented to verify the good environment adaptation and transmission performance of the wireless powered communication prototype system.

Key words: wireless powered communication; prototype design and implementation; large-scale antenna; dynamic wireless energy transmission; adaptive wireless energy and information transmissions

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62072314); Guangdong Natural Science Foundation (No.2023A1515011327)

1 引言

通过巧妙融合射频无线能量传输与无线通信技术,无线供能通信技术可同时满足低功耗物联网节点对能量供应和通信质量的双重需求,被广泛认为是未来 6G 时代实现能量可持续无线通信的一项关键技术^[1]. 不同于传统的只传输信息的无线通信技术,为满足物联网节点的能量需求,无线供能通信的设计必须满足一个新的无线能量“因果关系”约束,即,物联网节点从混合式接入节点(Hybrid Access Point, H-AP)获取的直流能量必须大于或者等于其接收和解调信息所消耗的能量^[2]. 在此约束下,现有工作对无线信息和能量联合传输的波束赋形^[3,4],上下行联合无线资源优化分配^[5,6],以及无线供能通信系统的优化部署^[7]等一系列难点问题展开了深入研究.

然而,现有工作大多聚焦在理论研究上,缺少落地的系统平台设计,难以明确无线供能通信系统的工程设计难点与实际应用性能. 随着多天线技术的广泛应用^[8],Powercast, Energous 和小米等多家科技公司研发了基于大规模天线(在发端安装几十甚至几百根天线)的射频无线能量传输系统^[9];学术界也开展了多天线无线能量传输平台的设计与搭建^[10,11],或者基于大规模天线的无线通信系统的研发^[12]. 但是,国内外研究在无线供能通信原型系统的设计与实现方面仍然是空白. 无线供能通信系统并不是无线通信系统与射频无线能量传输系统的简单叠加,其设计与实现仍面临下列诸多严峻挑战. (1)大规模天线技术的使用虽然可以提高无线能量和信息的端到端传输效率,却也由于无线信道估计时间的激增,降低了二者的时间传输效率^[13]. 如何在保证无线能量和信息高效传输的同时,有效降低无线信道估计时间是大规模天线无线供能通信系统中亟需解决的一个难点问题. (2)受无线能量接收机的低功率灵敏度与低效率的非线性直流功率转化特性影响,无线能量的端到端传输效率远低于无线信息传输^[14]. 如何在实际系统中满足无线能量“因果关系”约束,平衡无线能量和信息传输的多样化性能需求,是无线供能通信系统必须解决的一个实际问题. (3)混合式接入节点的部署可能对现有无线通信系统带来比较严重的信号干扰,也会带来较大的经济负担^[2]. 是否可以在现有无线通信系统基础上,用较小的代价灵活实现无线供能通信的功能,是一个非常值得探索的新问题. (4)原型系统的设计与实现不仅需要考虑硬件平台的配置,还需设计高效、开放的系统框架,完成从算法到传输协议,从模块协调工作到系统自适应运行的实现与性能验证. 这也对自适应无线供能通信系统设计的提出了新的挑战.

在现有通信系统中,基于大规模多人多出(massive

Multi-Input-Multi-Output, massive MIMO)和正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术,5G通信基站的物理层设计很好地匹配了无线供能通信系统中物理层设计的需求^[15];此外,5G通信基站的超密度部署方案也同样有利于无线供能通信系统中无线能量和信息的高效传输. 因此,基于现有通信基站的功能框架,本文创新性地融合无线能量和无线信息传输,设计并实现了无线供能通信原型系统.

本文的主要贡献如下:(1)提出了基于用户端能量状态反馈的闭环控制原型系统架构设计,原创性地设计了无线能量和信息自适应传输机制,实现了基于32发射天线阵列的无线供能通信原型系统;(2)创新性地提出了基于帧结构选择的无线能量动态传输方案,实现基于大规模天线的无线供能通信原型系统在信道估计准确性与无线能量传输时间效率之间的性能平衡;(3)基于实际的非线性能量采集模型和物联网节点能耗模型,提出了新颖的用户端信息-能量双阈值电池管理方案,在满足无线能量“因果关系”约束的前提下,灵活支持无线供能通信的多样化服务需求;(4)开展了丰富的室内外实验,验证了原型系统较强的环境适应性和传输性能. 即使是在用户端能量采集器仅-12 dBm的低功率灵敏度下,仍然能够很好地支持12 m的长距离无线能量和信息自适应传输.

2 无线供能通信原型系统架构与硬件平台

2.1 无线供能通信原型系统架构设计

图1给出了无线供能通信原型系统的总体框架与系统周边连接. 该系统平台由基站端、用户端与反馈链路三个部分组成. 基站端配置了32天线阵列,工作在1.2 GHz的ISM频段,采用基于OFDM的多载波调制技术与大规模天线技术在无线下行链路向用户端传输能量或者信息. 基站端主要包括前导信号传输、导频信号传输与无线能量和信息自适应传输三大功能模块. 用户端包括帧同步、信道估计、无线能量和信息切换接收以及可充电电池能量管理四大功能模块.

当基站端传输信息时,与传统的OFDM-MIMO通信系统的信息传输方式一致^[16],基站端的信息依次经过信息调制、预编码和OFDM调制后由32阵列天线发送;当传输能量时,原型系统产生随机序列并进行预编码,其余工作流程与信息传输相似. 在用户端,在完成帧同步,OFDM解调和信道估计等操作后,根据基站端的信息或者能量传输选择,用户端选择相应的信息解调或者能量整流操作. 用户端把获取到的直流能量存储在可充电电池中. 我们考虑用户端所有的操作都由其可充电电池中的能量维持^[3-7,14].

基站端对无线能量或者信息传输的选择与相应的

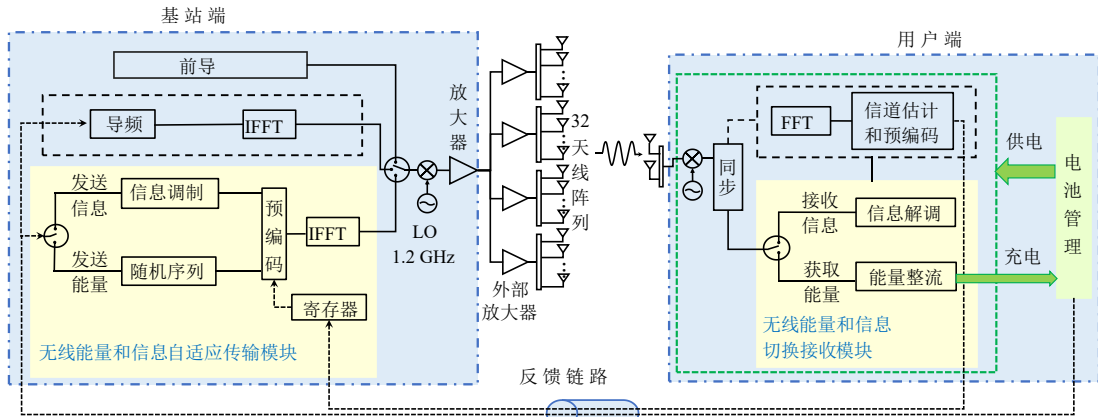


图1 大规模天线无线供能通信原型系统总体架构

波束赋形方案的确定,决定了用户端是否能及时获取足够的能量以保证高质量的信息接收,在无线供能通信原型系统的设计中至关重要。为帮助基站端即时获取用户端的电池能量状态信息以及信息接收质量信息,实现灵活、高效的无线能量和信息自适应传输,我们设计了基于用户端信息反馈的闭环控制系统架构。具体而言,在每一帧,用户端会通过反馈链路向基站端反馈两次信息:(1)在每一帧开始时,用户端向基站端反馈当前的能量状态信息和信息接收质量信息,基站端根据此信息选择在当前帧发送能量或者信息;(2)在估计出完整的无线信道状态信息后,用户端计算适用于当前帧的基站预编码方案并反馈给基站端,基站端利用反馈的预编码对当前帧要传输的无线信息或者无线能量信号进行波束赋形。

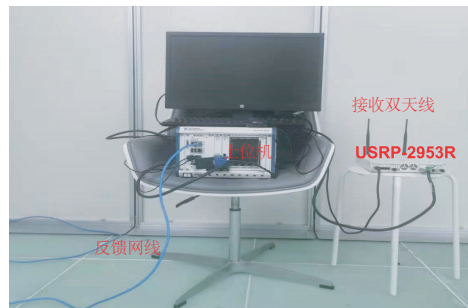
相对于没有建立用户端到基站端反馈信道的开环无线能量传输系统^[10]或者开环无线通信系统^[17],我们提出的闭环控制结构能更好地匹配用户端的能量和信息传输需求。相较于只能传输信息的闭环无线通信系统^[12]或者只能传输能量的闭环无线能量传输系统^[11],我们提出的无线供能通信原型系统能同时满足用户端的能量和信息需求,实现能量可持续的无线通信。

2.2 基于软件无线电定义的硬件平台配置

图2展示了完整的无线供能通信原型系统硬件平台。如图2(a)所示,基站端配置的32天线阵列由4块8天线阵列组成。基站端采用基于软件无线电定义的NI PXI系列平台和USRP设备。基站柜中安装了16个USRP设备,每个USRP设备连接2根发射天线。用户端同样采用USRP系列的软件无线电设备,并配置了2根棒状天线作为接收天线,如图2(b)所示。我们用网线连接基站端和用户端硬件设备上的TCP/IP端口,作为用户端到基站端的反馈链路。我们在LabView软件平台上编程实现图1中基站端与用户端的各个功能模块。其中,32天线阵列的信号处理是在基站端上位机集中



(a) 基站端硬件平台



(b) 用户端硬件平台

图2 基于32发射天线的无线供能通信原型系统硬件平台

完成的,USRP的同步由安装在基站端主机箱的时钟生成模块PXIe-6674T完成。

2.3 无线供能通信帧

图1所示的闭环系统架构需要基站端和用户端相互协调才能实现。借鉴LTE的帧结构^[16],我们设计了无线供能通信帧,如图3所示。在每一帧,基站端向用户端发送三种不同的无线信号,分别是前导信号,导频信号和数据信号。每一帧长度为 $T_{\text{frame}}=3\text{ ms}$,包含了共42个OFDM符号位。每一个符号位的时间长度约为0.07 ms。如图3所示,基站端在第1个符号位发送前导信号进行帧同步;在第2至第33个符号位,采用分时导频的方式让32根发射天线依次向用户端

发送导频信号,用于信道估计;第34个符号位是空(Empty)符号,用于区分导频信号和后续的数据信

号;在第35至第42个符号位,基站端向用户端传送信息或者能量.

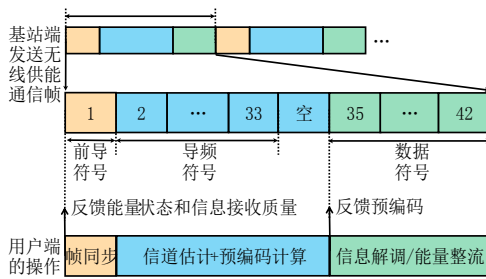


图3 基站端发送的无线供能通信帧与用户端的操作

在接收到了基站端的信号后,用户端会相应地进行帧同步、信道估计和预编码计算、信息接收或者能量采集和存储的操作,并通过反馈链路向基站端反馈能量状态和信息接受质量信息,以及预编码信息.

在原型系统中,用户端的能量状态与预编码的反馈时间都非常快(微秒级别).因此用户端的反馈时间不会影响基站端的操作.然而,用户端在上位机运行信道估计算法和预编码算法的时间通常会大于一帧的时长.为了避免对基站端的连续帧操作造成延迟,如图1所示,基站端将用户端反馈的预编码存储在寄存器中.基站端会在寄存器中取出最新的预编码作为当前帧的预编码进行波束赋形.

3 帧同步与信道估计的实现

这一节介绍基站端的前导与导频信号传输模块,以及用户端相应的帧同步模块与信道估计模块.无论基站端是选择传输信息还是能量,基站端与用户端在这两个模块的工作方式都是一致的.

3.1 帧同步算法

为区分于幅值通常起伏变化的导频和数据信号波形,我们采用了简单的直流方波作为基站端的前导信号,并在用户端设计了基于滑动窗口的帧同步算法.如图4所示,用户端将采样后的帧信号放入长度为 N_{sum} 的缓冲区.我们用 $\{a_k\}_{k \in \{0, \dots, N_{\text{sum}}-1\}}$ 表示缓冲区中所有信号采样点的幅度,其中 k 越小采样点越新.为保证缓冲区能够容纳至少一个完整的帧信号,有 $N_{\text{sum}} \geq 2N_{\text{frame}}$.令 N_{sync} 表示前导方波信号的采样点数目, N_{win} 表示滑动窗口可容纳的采样点数目.滑动窗口需要足够小,即, $N_{\text{win}} < N_{\text{sync}}$,用户端才能在缓冲区中成功定位前导信号.用户端的基于滑动窗口的帧同步算法包含以下两个步骤.

步骤1(定位前导信号):从 $k=0$ 开始,用户端滑动窗口按照 k 递增的方向(从左至右)每次仅滑动一个采

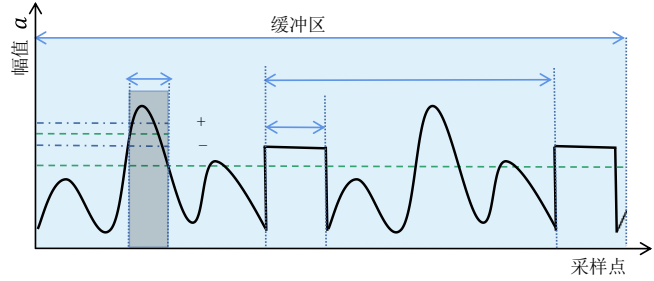


图4 用户端基于滑动窗口的帧同步算法示意图

样点.假设滑动窗口当前起始点位于第 k 个采样点,可得滑动窗口内所有采样点的平均幅值,即:

$$V_k: V_k = \frac{\sum_{i=0}^{N_{\text{win}}-1} |a_{k+i}|}{N_{\text{win}}} \quad (1)$$

设置采样点幅值阈值 θ .若 $V_k < \theta$,说明 a_k 不是前导信号的一个采样点,滑动窗口继续向右滑动1个采样点;否则,计算前导信号标志 g_k 如下:

$$g_k = \begin{cases} 1, & \text{if } \max \left\{ \left| |a_{k+i}| - V_k \right| \right\}_{0 \leq i \leq N_{\text{win}}-1} \leq \rho \\ 0, & \text{if } \max \left\{ \left| |a_{k+i}| - V_k \right| \right\}_{0 \leq i \leq N_{\text{win}}-1} > \rho \end{cases} \quad (2)$$

若 $g_k = 1$,即滑动窗口内的所有采样点幅值与 V_k 的差值不超过设置的浮动阈值 ρ , $0 < \rho \ll 1$,可判定 a_k 为前导信号的一个采样点,进入步骤2;否则,滑动窗口继续向右滑动1个采样点.

步骤2(定位帧起始点):以步骤1中找到的前导信号采样点位置 k 为起点,用户端按照 k 递减的方向(从右向左)回溯搜索出前导信号的起点位置.前导信号是直流方波,在其起点位置会有较大的幅值变化.在搜索的过程中,一旦出现 $|a_s| < \theta$, $0 \leq s \leq k-1$,便定位了前导信号的起始采样点 s ,完成了帧同步.

3.2 信道估计与预编码计算

无线供能通信原型系统总带宽为30 MHz,其中12 MHz上下频段是保护频带,实际有效的工作频带为中间的18 MHz.设置OFDM子载波间隔 $\Delta f = 15$ kHz,OFDM子载波数量为1200个^[16].由于基站端配置了32根发射天线,用户端配置了2根接收天线,可得完整的无线信道矩阵 \mathbf{H} 是一个维度为 32×1200 的大规模三维矩阵:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{1,1} & \mathbf{H}_{1,2} \\ \mathbf{H}_{2,1} & \mathbf{H}_{2,2} \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{H}_{32,1} & \mathbf{H}_{32,2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,对于 $\forall i \in \{1, 2, \dots, 32\}$ 和 $\forall j \in \{1, 2\}$, $\mathbf{H}_{i,j}$ 是一个维度为 $1\ 200 \times 1$ 的复数列向量,表示基站端第 i 根发射天线到用户端第 j 根接收天线在所有 $1\ 200$ 个子载波上的复数信道状态信息. 为避免不同发射天线间的信号干扰,基站端采取了分时导频的方式:在每一帧的第 $i+1$ 个导频符号位, $i \in \{1, 2, \dots, 32\}$, 只有第 i 根发射天线发送导频信号,其它所有天线都保持静默. 用户端采用经典的最小二乘算法^[18]估计 $\mathbf{H}_{i,j}$.

根据信道矩阵 \mathbf{H} , 用户端以最大化用户端天线接收到的基站端信号功率为目标来计算预编码. 这样的预编码方案既可以保证当基站端传输信息时,用户端接收到的信噪比最大,也可以保证当基站端传输能量时,到达用户端天线的信号能量最大. 此预编码矩阵可由对无线信道状态矩阵 \mathbf{H} 进行 SVD 分解后获得^[19].

4 无线能量动态传输方案

无线供能通信系统最大的特点是在基站端融入了无线能量传输,为用户端提供能量可持续的通信保障. 这一节介绍原型系统的无线能量动态传输方案.

4.1 用户端非线性能量采集模型

当基站端传输无线能量时,到达用户端能量采集器射频端口的信号能量需要通过整流器件转换成直流能量后才能被用户端存储和使用. 假设基站端在第 i 帧传输无线能量. 令 $P_{i,k}^{\text{rec}}$ 表示第 k 个 OFDM 符号时间内到达用户端天线的信号功率. 经过用户端整流器件后, $P_{i,k}^{\text{rec}}$ 转化为用户端可以存储和使用的直流信号功率 $P_{i,k}^{\text{har}}$. 现有大多数理论研究都简单假设 $P_{i,k}^{\text{har}}$ 随着 $P_{i,k}^{\text{rec}}$ 的增加而线性增加. 如图 5 所示,实际的能量采集器的功率转化效率 $P_{i,k}^{\text{har}}/P_{i,k}^{\text{rec}}$ 通常很低且是非线性的.

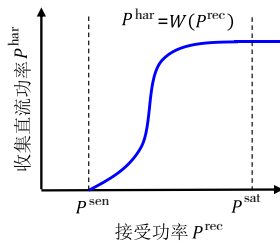


图5 用户端能量采集模块的非线性功率转化

虽然用户端能量采集器的设计不属于本文工作考虑的范畴,但是为了反映实际的直流功率获取大小,我们根据现有工作建立了用户端的非线性能量采集模型如下^[20]:

$$P_{i,k}^{\text{har}} = \begin{cases} 0, & \text{if } P_{i,k}^{\text{rec}} \leq P^{\text{sen}} \\ P_{i,k}^{\text{rec}} W(P_{i,k}^{\text{rec}}), & \text{if } P^{\text{sen}} < P_{i,k}^{\text{rec}} < P^{\text{sat}} \\ P^{\text{sat}} W(P^{\text{sat}}), & \text{if } P_{i,k}^{\text{rec}} \geq P^{\text{sat}} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $P^{\text{sen}} > 0$ 和 $P^{\text{sat}} > 0$ 分别表示能量采集器的感知功率和饱和功率. 如果 $P_{i,k}^{\text{rec}} \leq P^{\text{sen}}$, 能量采集器未激活, 不能获得任何可用的直流能量; 如果 $P^{\text{sen}} < P_{i,k}^{\text{rec}} < P^{\text{sat}}$, 能量采集器采集到的直流功率可由非线性功率转化效率函数 $W(P_{i,k}^{\text{rec}})$ 与 $P_{i,k}^{\text{rec}}$ 的乘积获得, 其中 $W(\cdot)$ 可根据实际整流器件的工作性能采用参数拟合法得到^[20]; 如果 $P_{i,k}^{\text{rec}} \geq P^{\text{sat}}$, 能量采集器饱和, $P_{i,k}^{\text{har}}$ 恒为 $P^{\text{sat}} W(P^{\text{sat}})$. 由 2.3 节可知, 原型系统中一个 OFDM 符号的时间长度为 $\delta = 0.07$ ms. 用户端在第 k 个 OFDM 符号位采集到的直流能量 $E_{i,k}^{\text{har}}$ 可以表示为:

$$E_{i,k}^{\text{har}} = P_{i,k}^{\text{har}} \delta \quad (5)$$

从用户端的角度看, 要提高用户端在一帧中可获取的直流能量可从两个角度入手: (1) 提高无线能量的端到端传输效率, 通过增加 $P_{i,k}^{\text{rec}}$ 来增加 $P_{i,k}^{\text{har}}$. 虽然原型系统中使用了基于大规模天线的波束赋形方案来提高无线能量传输的端到端传输效率, 但受非线性能量采集器件的影响, 用户端在一个 OFDM 符号位采集到的直流能量 $E_{i,k}^{\text{har}}$ 仍然较小; (2) 提高无线能量在一帧中的时间传输效率, 让用户端可以在更多的 OFDM 符号位获取可以累加的直流能量. 然而, 根据图 3 所示的无线供能通信帧结构, 由于采用了分时导频, 一帧中只有 8 个符号位可用于传输无线能量. 这导致基站端无线能量传输的时间效率很低(仅占总帧长时间 18.67%). 我们因此需要设计新的帧结构来提高无线能量的时间传输效率.

4.2 能量传输帧的设计

这一小节在不改变帧长和不改变无线供能通信帧结构的双重前提下, 完善原型系统中用于无线能量传输的帧结构, 以提高无线能量传输的时间效率. 我们注意到, 用户端对信息接收和能量接收有不同的性能评估准则. 对于接收无线能量, 用户端关心的是每一帧可以携带多少能量, 这由无线信号的包络或者幅度值决定; 而对于接收无线信息, 用户端关心的是能否正确解调出无线信号中携带的每一个数据比特. 相对于能量接收, 信息接收更依赖于无线信道估计的准确性. 这启发我们在传输无线能量时, 以适当牺牲信道信息的准确性为代价来换取无线能量传输的高效性.

为此, 我们专门设计了仅用于无线能量传输的能量传输帧, 如图 6 所示. 与图 3 的无线供能通信帧相似, 能量传输帧也由 42 个 OFDM 符号位组成, 一帧的时长为 3 ms. 与无线供能通信帧不同的是, 能量传输帧中除了第一个符号位用于传输前导信号进行帧同步, 其余 41 个符号位全部用于传输无线能量. 因此, 若采用能量传输帧发送无线能量, 基站端不会发送分时导频信号; 相应地, 用户端也不会进行信道估计和预编码矩阵的计算. 在进行帧同步的操作后, 用户端直接启动能量采

集,获取无线信号携带的直流能量并存储在可充电电池中.

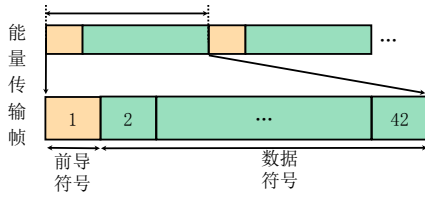


图6 能量传输帧的帧结构

虽然能量传输帧可以用更多的 OFDM 符号位携带更多的能量,但由于缺少信道估计,基站端的预编码矩阵不会更新. 如果长时间只使用能量传输帧,可能会由于预编码矩阵严重不匹配无线信道而降低无线能量的端到端传输效率. 为解决此问题,我们在下一小节提出新颖的无线能量动态传输方案.

4.3 基于信道稳定性反馈的无线能量动态传输方案

为平衡无线能量传输的时间传输效率和端到端传输效率,我们设计了无线能量动态传输方案,通过灵活选择无线供能通信帧或者能量传输帧传输无线能量. 具体而言,当基站端传输无线能量时,对于基站端连续发送的第 m 帧(无线供能通信帧或者能量传输帧), $m \geq 1$, 令 N_m 表示此帧中用于传输无线能量的 OFDM 符号数. 如果第 m 帧采用无线供能通信帧传输能量,可得 $N_m = 8$; 如果第 m 帧采用能量传输帧,可得 $N_m = 41$. 根据式(5),用户端在第 m 帧采集到的总直流能量 E_m^{har} 为

$$E_m^{\text{har}} = \sum_{k=42-N_m+1}^{42} E_{m,k}^{\text{har}} \quad (6)$$

基站端根据信道状态是否稳定选择不同的帧结构. 令 $A_i = 0$ 表示基站端发送第 i 帧时信道状态稳定, $A_i = 1$ 表示不稳定. 设置信道稳定阈值 σ , $0 < \sigma < 1$. 在第 i 帧开始时,对于任意 $m \in \{i-Q, \dots, i-1\}$, 用户端根据下式计算 A_i 并反馈给基站端:

$$A_i = \begin{cases} 0, & \text{if } \max |E_m^{\text{har}} - \bar{E}_i| < \sigma \\ 1, & \text{if } \max |E_m^{\text{har}} - \bar{E}_i| \geq \sigma \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\bar{E}_i = \sum_{m=i-Q}^{i-1} E_m^{\text{har}} / \sum_{m=i-Q}^{i-1} N_m$ 表示用户端在当前帧 i 的前 Q 帧中采集到的平均符号能量. 从式(7)可知,如果用户端前 Q 帧中每一帧获取的总直流能量 E_m^{har} 与 \bar{E}_i 的绝对差值都小于信道稳定阈值 σ , 即, $\max \{|E_m^{\text{har}} - \bar{E}_i|\} < \sigma$, 无线信道状态被认为是稳定的; 反之, 无线信道状态发生较大变化. 在初始化阶段, 即当前帧序列 $i < Q$ 时, 我们假设 $A_i = 1$.

基于用户端反馈的 A_i , 算法 1 给出了基站端的无线

能量动态传输方案. 假设基站端在第 i 帧决定传输无线能量. 结合图 1 所示的系统总体架构, 如果基站端收到反馈信息 $A_i = 1$, 基站端选择无线供能通信帧, 获取更新的预编码; 如果 $A_i = 0$, 基站端采用能量传输帧. 若是后者, 基站端跳过分时导频信号发送模块(图 1 中基站端的黑色虚线框), 直接使用寄存器中存储的旧的预编码传输能量信号; 相应地, 如果 $A_i = 0$, 用户端略过信道估计和预编码计算模块(图 1 中用户端的黑色虚线框), 直接进入能量采集模块.

算法 1 无线能量动态传输方案

1. 第 i 帧开始, 用户端根据式(7)计算 A_i 并反馈;
2. 基站端收到反馈信息后判断是否在第 i 帧传输能量;
3. IF 基站端在第 i 帧传输能量 THEN
4. IF $A_i = 1$ THEN//发送无线供能通信帧
5. 发送前导信号;
6. 32 天线分时发送导频信号;
7. 使用更新的预编码发送能量信号;
8. ELSE//发送能量传输帧
9. 发送前导信号;
10. 使用旧未更新的预编码发送能量信号;
11. ENDIF
12. ENDIF
13. $i++$, 跳转至步骤 1;

当式(7)中信道稳定阈值 σ 增大时, 由于基站端会更多地采用不执行信道估计的能量传输帧, 信道信息的准确性会变得更差, 用户端在每一个 OFDM 符号时间内获取的平均直流能量会更小. 然而, 相比于无线供能通信帧的 8 个能量传输符号时间, 能量传输帧有 41 个符号时间用于能量传输, 具有更高的无线能量时间传输效率. 因此, 通过设置适当的信道稳定阈值 σ , 我们提出的能量动态传输方案可以实现信道信息准确性和无线能量时间传输效率的折中, 从而有效提高用户端可以获取的直流能量大小. 我们将在第 6 节的实验部分验证上述性能.

5 无线能量和信息自适应传输机制

为了更好地适应不同无线信道状态下的信息传输, 这一节首先提出了基站端自适应信息调制方案. 然后, 通过融合基站端的无线信息传输和第 4 节介绍的无线能量动态传输方案, 提出基于用户端能量状态信息反馈的无线能量和信息自适应传输机制.

5.1 基站端自适应信息调制方案

我们考虑了 QPSK、16-QAM、64-QAM 和 256-QAM 四种不同的调制方式. 不同于现有理论工作较为复杂的调制选择方式^[21], 为便于落地实现, 在原型系统中, 基站端根据用户端反馈的信息接收质量信息自适应选

择当前帧的信息调制方式。

令 $Y_i \in \{0, 1\}$ 表示用户端接收第 i 帧信息接收质量, 其中 $Y_i=0$ 表示出现误码, $Y_i=1$ 表示没有出现误码. 根据 LTE 标准^[16], 我们将每个 OFDM 符号划分为 100 个资源块 (Resource Block, RB), 每个 RB 内含有 12 个子载波. 每个 RB 中插入一段基站端和用户端都已知的参考信息. 用户端将接收到的信息符号解调之后, 根据参考信息正确与否判断是否出现误码. 只要在第 i 帧存在 RB 的参考信息出现错误的情况, 用户端就认为第 i 帧信息的接收出现了误码并设置 $Y_i=0$; 否则, 用户端认为第 i 帧信息接收无误并设置 $Y_i=1$. 在第 i 帧结束时, 用户端将 Y_i 作为第 i 帧的信息接收质量反馈给基站端.

基站端根据用户端在第 $(i-1)$ 帧结束时反馈的 Y_{i-1} 选择其在第 i 帧的信息调制方式. 令 $M_i \in \{0, 1, 2, 3\}$ 表示基站端第 i 帧信息传输开始时选择的调制方式, 其中 M_i 的取值 0、1、2 和 3 分别对应 QPSK、16-QAM、64-QAM 和 256-QAM 四种不同的调制方式. 为确定 M_i 的取值, 基站端用计数变量 u_i 来统计在第 i 帧开始前用户端连续无误码的信息接收帧数:

$$u_i = \begin{cases} 0, & \text{if } Y_{i-1}=0 \\ (u_{i-1}+1) \bmod \lambda, & \text{if } Y_{i-1}=1 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\lambda > 0$ 是用户端连续无误码信息帧数的最大统计值, mod 表示求余操作. 我们可得 M_i 如下:

$$M_i = \begin{cases} \min(0, M_{i-1}-1), & \text{if } u_i=0 \\ M_{i-1}, & \text{if } 0 < u_i < \lambda \\ \max(3, M_{i-1}+1), & \text{if } u_i=\lambda \end{cases} \quad (9)$$

由式(8)和(9)可观察到, 若 $u_i=0$, 即 $Y_{i-1}=0$, 用户端在第 $(i-1)$ 帧出现了误码, 基站端在第 i 帧采取比第 $(i-1)$ 帧低一阶的调制方式, 以确保信息传输的可靠性; 若 $u_i=\lambda$, 说明信道质量很好, 用户端已经至少有连续 λ 帧都正确接收信息, 基站端在第 i 帧采取比第 $(i-1)$ 帧高一阶的调制方式, 以提高信息传输的效率; 若 $0 < u_i < \lambda$, 基站端在第 i 帧采取与第 $(i-1)$ 帧同样的调制方式. 其中, 若 $u_i=0$ 时, 有 $M_{i-1}=0$ (即, 已经是最低阶的调制方式 QPSK), 则 $M_i=M_{i-1}$; 同理, 若 $u_i=1$ 时, 有 $M_{i-1}=3$ (即, 已经是最高阶的调制方式 256-QAM), 则 $M_i=M_{i-1}$. 当基站端刚开始发送信息 (或者从能量传输刚切换至信息传输) 的时候, 由于无法判断当前信道质量是否利于信息传输, 为保证信息传输的可靠性, 基站端采取 QPSK 的调制方式.

在图 1 所示的信息调制模块, 基站端在确定当前帧信息传输的调制方式后, 根据表 1 产生相应长度的信息数据包, 并将数据包中的信息比特映射到对应的调制符号, 从而完成信息调制. 根据图 3 所示的无线供能通信帧结构, 在发送前导信号、分时导频信号后, 基站端

从寄存器中提取最新的预编码矩阵对调制后的信息进行预编码, 然后采用 IFFT 对预编码后的无线信号进行 OFDM 调制, 最后在 1.2 GHz 载频从 32 天线阵列发出. 用户端采用最小均方差的均衡方法还原基站端发送的调制符号并解调获得相应的信息比特.

表 1 不同调制方式下调制符号的比特数与数据包的长度

调制方式	每个调制符号承载的比特数	数据包长度/byte
QPSK	2	300
16-QAM	4	600
64-QAM	6	900
256-QAM	8	1 200

5.2 用户能耗模型

基站端根据用户端反馈的电池能量状态判断在当前帧是传输信息还是能量. 根据图 1 所示的用户端工作模块, 我们建立用户端的能耗模型如下.

当用户端在当前帧接收信息, 其能量消耗主要来自以下四个部分: (1) 帧同步的能耗 $e_{\text{syn}} > 0$; (2) 估计信道与计算预编码的能耗 $e_{\text{csi}} > 0$; (3) 解调和均衡处理的能耗 $e_{\text{dem}} > 0$; (4) 除以上三个部份外, 其余模块的电路工作能耗记为 $e_f > 0$. 令 $C^I = e_{\text{syn}} + e_{\text{csi}} + e_{\text{dem}} + e_f$ 表示用户端接收信息的一帧总能耗.

当用户端在当前帧接收能量, 如果基站端采用无线供能通信帧携带能量, 用户端需要估计信道并计算预编码矩阵. 在这种情况下, 用户端的能耗包括了帧同步的能耗 e_{syn} , 信道估计与预编码计算的能耗 e_{csi} , 以及其余相关电路模块的工作能耗 e_g . 由于能量采集器结构相对于信息接收器更为简单, 我们有 $0 < e_g < e_f$. 如果基站端采用能量传输帧, 用户端的能耗由 e_{syn} 与 e_g 组成. 我们用 $C_1^E = e_{\text{syn}} + e_{\text{csi}} + e_g$ 和 $C_0^E = e_{\text{syn}} + e_g$ 分别表示用户端处理无线供能通信帧或者能量传输帧以获取直流能量的能耗.

5.3 用户端信息-能量双阈值电池管理策略

记 $F_i \in \{0, 1\}$ 为用户端在第 i 帧开始时反馈的单一特电池能量状态信息, 表示用户端在第 i 帧是否有充足的电池能量接收信息 (其中, $F_i=1$ 或者 $F_i=0$ 分别表示用户端电池能量充足或者不充足). 相应地, 如果基站端接收到用户端反馈的电池能量状态信息 $F_i=1$, 基站端在第 i 帧选择传输无线信息; 否则, 基站端选择传输无线能量. 为了能即时判定用户端是否电池能量充足并且充分利用用户端存储的直流能量, 令 H_I 和 H_E 分别表示信息传输阈值和能量传输阈值且 $H_I > H_E \geq C^I$. 我们提出基于信息-能量双阈值的 F_i 决策方案如下:

$$F_i = \begin{cases} 0, & \text{if } B_i \leq H_E \text{ or } H_E \leq B_i \leq H_I, F_{i-1}=0 \\ 1, & \text{if } B_i \geq H_I \text{ or } H_E \leq B_i \leq H_I, F_{i-1}=1 \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中, B_i 表示用户端在第*i*帧开始时的电池能量. 当 $B_i \leq H_E$, 判定用户端电池能量不充足, 需要在第*i*帧获取能量, 因此设置 $F_i=0$, 让基站端在第*i*帧向用户端传输能量. 当 $H_E \leq B_i \leq H_1$, 如果 $F_{i-1}=1$ (即, 基站端在前一帧传输信息), 由于用户端的当前电池能量没有低于能量传输阈值 H_E , 因此基站端可以在当前帧继续传输信息并设置 $F_i=1$; 如果 $F_{i-1}=0$ (即, 基站端在前一帧传输的能量还没有达到用户端传输信息需要的能量阈值 H_1), 用户端需要基站端在当前帧继续传输能量, 因此设置 $F_i=0$. 当 $B_i \geq H_1$, 判定用户端有充足的电池电量在第*i*帧接收信息, 因此设置 $F_i=1$, 让基站端在第*i*帧传输信息. 在原型系统的实现中, 我们假设用户端在第1帧开始时的电池能量充足, 即, $B_1 \geq H_1$, 因而 $F_1=1$.

从式(10)可以观察到, 两个电池能量阈值的差值决定了用户端的电池能量从低于 H_E 到高于 H_1 所需要的充电时间, 也等效地决定了用户端的电池能量从高于 H_1 到低于 H_E 可以支撑的信息传输时间. 在第6节的实验中, 通过设置不同的双电池能量阈值, 我们验证双阈值电池能量管理策略可以用来支持不同的无线供能通信服务需求.

5.4 基于用户端 3-bit 反馈的无线能量和信息自适应传输机制

根据式(7)~(10), 在每一帧开始时, 用户端需要向基站端反馈 3-bit 信息 F_i, A_i 和 Y_i , 以帮助基站端在第*i*帧选择传输能量或者信息并决定相应的帧结构或者选择相应的信息调制方式. 其中, 2-bit $[F_i, A_i]$ 为用户端的能量状态信息, 单比特 Y_i 为信息接收质量信息. 令 $B_{\max} > 0$ 表示用户端可充电电池的容量. 假定 B_{i-1} 已知, $i > 1$, 根据用户端的能耗模型和第*i*-1帧的能量状态信息 $[F_{i-1}, A_{i-1}]$, B_i 更新如下:

$$B_i = \begin{cases} B_{i-1} - C^I, & \text{if } F_{i-1} = 1 \\ (B_{i-1} - C_1^E + E_{i-1}^{\text{har}})_-, & \text{if } F_{i-1} = 0, A_{i-1} = 1 \\ (B_{i-1} - C_0^E + E_{i-1}^{\text{har}})_-, & \text{if } F_{i-1} = 0, A_{i-1} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中, $(x)_- = \min(x, B_{\max})$, E_{i-1}^{har} 由式(6)得到.

基于用户端反馈的能量状态信息 $[F_i, A_i]$ 和信息接收质量信息 Y_i , 图7给出了原型系统中完整的无线能量和信息自适应传输机制. 在基站端, 如果 $F_i=0$, 基站端根据算法1中的无线能量动态传输方案, 基于 A_i 的值决定采用无线供能通信帧 ($A_i=1$) 或是能量传输帧 ($A_i=0$) 传输无线能量; 如果 $F_i=1$, 基站端不再读取 A_i 的值 (用户端这时默认设置 $A_i=1$), 直接采用无线供能通信帧发送信息, 这时基站端需要读取 Y_i 的值, 并根据5.1小节决定当前帧的调制方式. 如果基站端采用无线供能通信帧 (传输能量或者信息), 基站端启用图1中的导频信号发送模块; 否则, 基站端略过导频信号发送模块直接传输能量.

在用户端, 假设用户端当前接收的是基站端发送的第*i*-1帧. 执行帧同步的操作后, 用户端根据 F_{i-1} 判断在当前帧进行信息接收或是直流能量采集. 如果 $F_{i-1}=1$, 用户端执行信道估计和预编码计算, 并将计算出的预编码反馈至基站, 然后进行OFDM解调、均衡等操作获得基站传输的信息. 如果 $F_{i-1}=0$, 用户端进一步根据信道稳定信息 A_{i-1} 判定当前帧是无线供能通信帧还是能量传输帧: 若 $A_{i-1}=0$, 用户端直接采集直流能量; 否则, 用户端在计算并反馈预编码后再采集直流能量. 在第*i*-1帧处理完毕后, 用户端开始处理第*i*帧. 用户端更新其在第*i*帧开始时的电池电量, 计算并反馈第*i*帧 3-bit 信息 A_i, Y_i 和 F_i 至基站端. 基站端和用户端继续进行第*i*帧的操作.

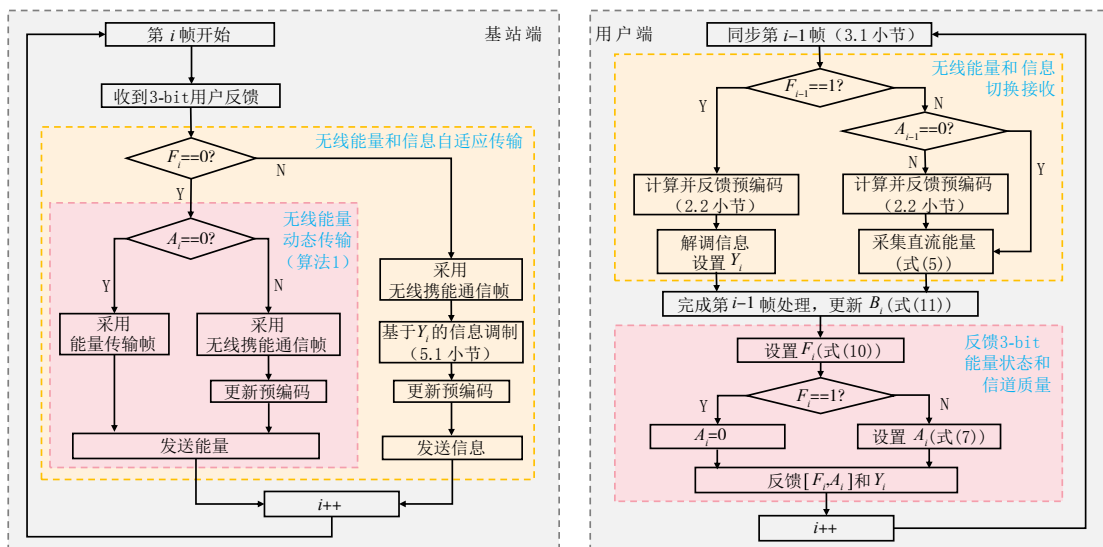


图7 无线能量和信息自适应传输机制完整框图

6 实验与性能验证

我们首先验证无线能量动态传输方案(算法1)的性能,然后验证无线能量和信息自适应传输机制(图7)的性能. 用户端模根据4.1小节模拟了具有较低感知功率 $P^{sen} = 10^{-1.2} \text{ mW}$ 的 PowercastP2110B 非线性能量采集器. 我们考虑了室内和室外两种实验场景. 如图8(a)所示,受室内场地限制,在室内开展实验时,基站端与

用户端之间的水平距离固定为 4 m. 如图8(b)所示,在室外开展实验时,我们逐步延长了基站端与用户端之间的距离. 当基站端用32根天线发射信号时,频谱仪测得每一个8-天线阵列中心点的功率约为 1.5 W,距离基站柜中心 50 cm 处的信号功率约为 0.2 W. 表2总结了原型系统参数. 本节的所有实验都是在上述场景和参数下开展的.

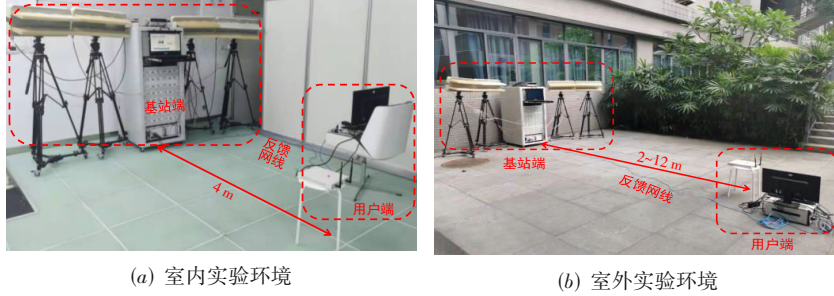


图8 实验环境设置

表2 无线供能通信原型系统参数

参数名称	数值	参数名称	数值
基站端天线数目	32	每一帧时长	3 ms
用户端天线数目	2	每帧符号数目	42
系统采样率	30.72 MHz	符号位时长	0.07 ms
中心频率	1.2 GHz	FFT大小	2 048
系统带宽	30 MHz	子载波数目	1 200
子载波间隔	15 kHz	资源块数目	100

6.1 无线能量动态传输实验

在无线能量动态传输实验中,用户端保持反馈 $F_i = 0$,基站端采用算法1进行无线能量动态传输. 室内环境考虑两种场景. 场景1:室内没有人来回走动;场景2:室内有多个人随机走动. 受多径效应的影响,场景1的无线信道状态比场景2会稳定很多.

对于无线信道状态稳定的场景1,图9展示了当基

站端连续传输500个帧序列时,用户端从每一帧中获取到的直流能量的大小,其中“ f_1 ”和“ f_2 ”分别表示基站端采用无线供能通信帧或者能量传输帧. 在初始化的第1到25帧,基站端采用了无线供能通信帧,并从第26帧开始切换到了能量传输帧. 由于场景1中的无线信道状态比较稳定,根据式(7),基站端持续采用能量传输帧. 从图9可以观察到,用户端从能量传输帧获取到的直流能量是无线供能通信帧的4倍左右,这也验证了原型系统中使用能量传输帧提高无线能量传输效率的设计思想.

对于无线信道状态不稳定的室内场景2,从图10可以观察到,根据算法1,基站端在无线供能通信帧(“ f_1 ”)和能量传输帧(“ f_2 ”)之间动态切换传输. 对于信道不稳定的场景2,用户端从能量传输帧获取的能量仍至少是无线供能通信帧的3倍. 基于无线供能通信帧的无线能量传输也是现有工作^[11]中的无线能量传输方案. 图

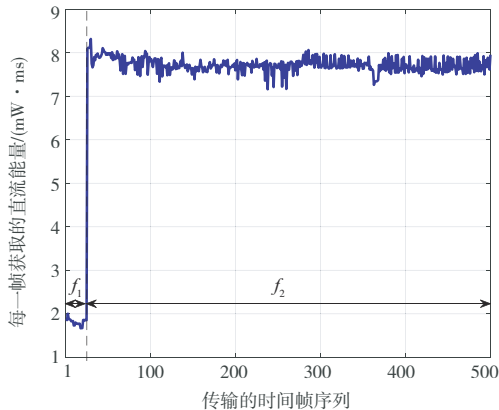


图9 室内场景1(无线信道稳定):用户端获取的直流能量

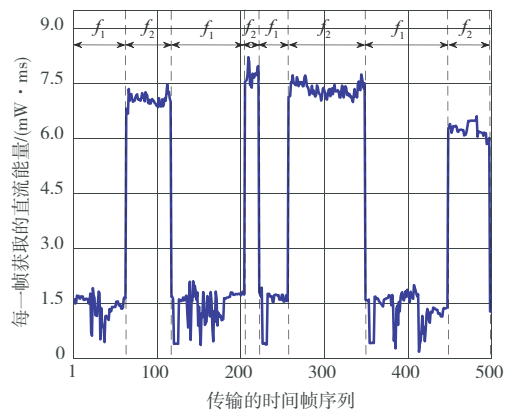


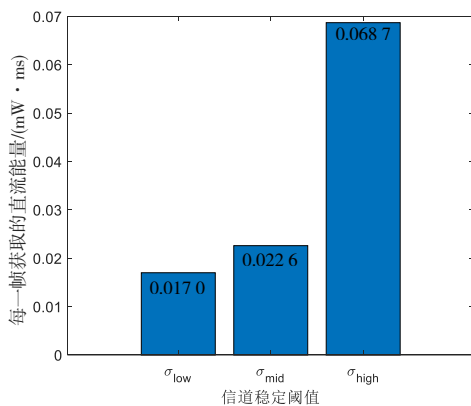
图10 室内场景2(无线信道不稳定):用户端获取的直流能量

9和图10均说明相对于现有工作,我们提出的无线能量动态传输方案具有更高的传输效率.

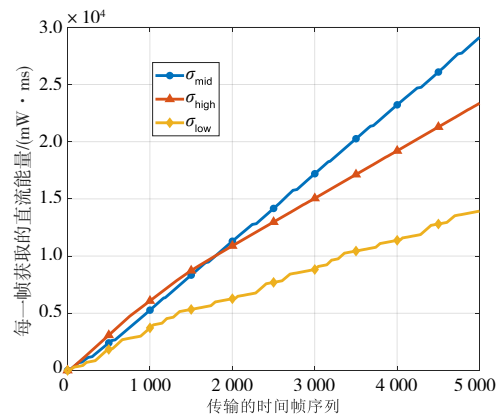
接下来,在无线信道状态不稳定的室内场景2下,根据式(7),我们通过在在不同信道稳定阈值 σ 下开展无线能量动态传输实验,分析信道信息的准确性对无线能量动态传输方案性能的影响.图11设置了低、中、高三种不同的信道稳定阈值, $\sigma_{\text{low}}=0.1$, $\sigma_{\text{mid}}=0.5$, $\sigma_{\text{high}}=1$,单位均是 $\text{mW}\cdot\text{ms}$.在每种阈值场景下,基

站端都传输了5 000帧能量.

图11(a)展示了用户端分别在无线供能通信帧和能量传输帧的每一个能量传输符号时间内获取的平均直流能量的差值.根据4.3小节对算法1的讨论,此差值越小说明在整个5 000帧的无线能量传输中基站端使用的信道信息越准确.图11(b)展示了用户端在所有时间帧上获取的总直流能量.从图11可以观察到以下几点.



(a) 单能量符号时间内获取的平均直流能量差值



(b) 用户端在所有帧获取的直流能量之和

图11 不同信道稳定阈值的比较

(1)在低阈值 σ_{low} 场景下,基站端会更多地采用无线供能通信帧,用户端进行信道估计,从而确保了信道信息的准确性.从图11(a)可以观察到,这种情况下的平均直流能量差值是三组不同阈值实验中最小的,信道信息的准确性是最高的.然而,从图11(b)可以观察到,由于基站端更多地采用无线供能通信帧,平均每一帧内用于传输能量的OFDM符号减少了,用户端从每一帧获取的总能量是三组对比实验中最少的.

(2)在高阈值 σ_{high} 场景下,基站端会更多地采用能量传输帧.从图11(a)可以观察到,由于没有及时执行信道估计,这种情况下的平均直流能量差值是三组阈值对比实验中最大的,信道信息的准确性是最差的.然而,从图11(b)可以观察到,即使信道信息的准确性差,由于能量传输帧的长期使用提高了能量传输时间效率,用户端获取的总能量高于 σ_{low} 场景.

(3)在中等阈值 σ_{mid} 场景下,基站端会平衡两种帧结构的使用次数,既能保持对信道矩阵的及时更新,又能保持较高的无线能量时间传输效率.从图11(a)可以观察到,中等阈值 σ_{mid} 下信道信息的准确性虽不及 σ_{low} 场景,但好于 σ_{high} 场景.从图11(b)可以观察到,由于使用了足够多的能量传输帧,用户端在 σ_{mid} 场景下获取的总能量始终高于 σ_{low} 场景,并在大约1 800帧的时候超过了 σ_{high} 场景.由此可见,适当的信道稳定阈值 σ_{mid} 实

现了信道信息准确性与无线能量时间传输效率之间更为恰当的折中,从而有效提高用户端获取的直流能量大小.

下面在图8(b)室外环境下进行无线能量传输实验.我们对比了基站端用全部32根发射天线和只使用12根发射天线两种场景.对于后者,图3所示无线供能通信帧中用于分时导频的OFDM符号数调整为12,承载无线能量的数据符号为28;频谱仪测得每个8-天线阵列处的最大信号功率为1 W,距离基站柜50 cm处测得的信号功率为0.1 W.

从图12可以观察到,户端获取的直流能量随传输距离的增加而下降.虽然12天线场景下的28个能量传输符号远多于32天线场景下的8个能量传输符号,但由于32天线形成的波束相对于12天线更窄,能量更集中,在所有传输距离上,用户端从32天线获取的直流能量都远大于12天线.这也说明了增加天线数目对提高无线能量端到端传输效率的重要性.此外,在32发射天线场景下,即使在传输距离为较长的12 m时,用户端平均每帧获取的直流能量仍有 $0.44 \text{ mW}\cdot\text{ms}$.这意味着,如果低功耗的物联网节点的能量需求是 $20 \text{ mW}\cdot\text{ms}$,基站端只需约136 ms的长距离无线能量传输就可以满足物联网节点的能量需求.

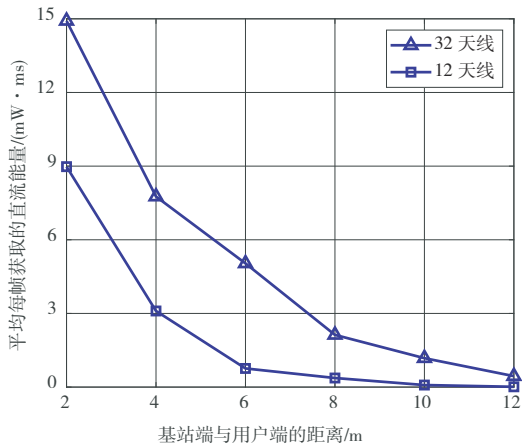


图 12 室外环境:用户端获取的直流能量随传输距离的变化

6.2 无线能量和信息自适应传输实验

这一节验证我们提出的无线能量和信息自适应传输方案的性能. 根据低功耗物联网节点的能耗研究^[22], 设置 $C^I = 50 \text{ mW} \cdot \text{ms}$, $C_1^E = 25 \text{ mW} \cdot \text{ms}$, $C_0^E = 0.01 \text{ mW} \cdot \text{ms}$, $B_{\max} = 50\,000 \text{ mW} \cdot \text{ms}$. 我们通过实验绘制用户端可充电电池能量随时间的变化.

在图 8(a)室内环境下,我们固定能量传输阈值 $H_E = 5\,000 \text{ mW} \cdot \text{ms}$, 考虑了较低的信息传输阈值 $H_I = 20\,000 \text{ mW} \cdot \text{ms}$ 和较高的信息传输阈值 $H_I = 40\,000 \text{ mW} \cdot \text{ms}$ 两种场景. 用户端的初始电池能量为 B_{\max} . 无论是图 13(a)的低信息传输阈值还是图 13(b)的高信息传输阈值,随着基站端的信息或者能量传输决策的改变,用户端的电池电量不断震荡变化. 对于图 13(a)所示的低信息传输阈值,由于用户端只需要累积较少的电池电量就会触发基站端的信息传输,基站端可以更快地将信息传输到用户端,实现较低的信息传输延迟;对于图 13(b)所示的高信息传输阈值时,虽然需要等待较长的充电时间才能发送信息,但是在充足的用户端能量保障下,基站端的信息传输时间更长,

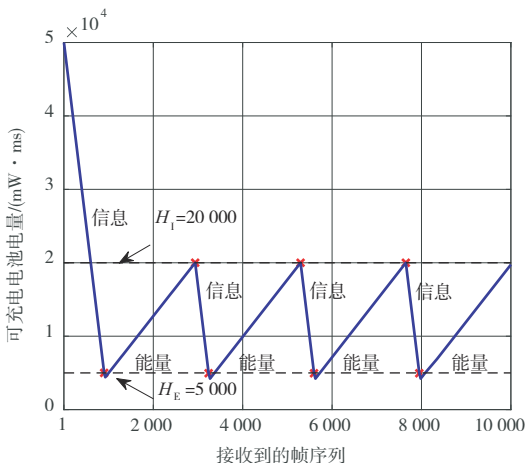


图 13 室内环境无线供能通信实验

信息传输更加可靠. 因此,通过设置不同的信息-能量双电池阈值,无线供能通信原型系统可以灵活适配不同的无线能量和信息传输需求.

在图 8(b)的室外环境下,图 14 展示了 $H_I = 40\,000 \text{ mW} \cdot \text{ms}$ 时用户端电池能量随时间的变化. 基站端和用户端之间的距离为 10 m. 不同于图 13 中的短距离传输场景,当基站端长距离传输能量时,用户端的电池电量体现出了明显的非线性上升趋势. 这是因为在长距离传输下,用户端需要更长的充电时间,在这段时间内,无线信道状态难以一直稳定. 因此,能量传输帧固定的预编码方案逐渐难以匹配无线信道的变化,导致用户端获取的直流能量逐渐减小. 当信号能量的改变超过能量稳定阈值 σ 时,基站端重新选择用无线供能通信帧.

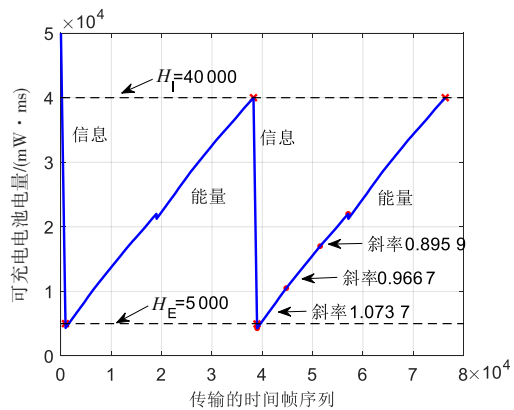


图 14 室外环境无线供能通信实验

此外,相较于图 13(b)中约 5 000 帧(即 $5\,000 \times 3 \text{ ms} = 15 \text{ s}$)的充电时间,图 14 中由于较长的传输距离,用户端需要约 40 000 帧(即 $40\,000 \times 3 \text{ ms} = 120 \text{ s}$)的充电时间才能将用户端的电池电量从低于 H_E 充到高于 H_I . 对于远距离无线能量传输,在高信息传输阈值(即,高能量需求)下,120 s 的充电时间仍体现了较好的无线能量传输性能. 但对无线通信而言,120 s 的充电时间可能会影响时延敏感的信息传输服务质量. 在下一步工作中,我们将从优化基站端的位置部署^[23]和用户端能量管理策略^[24]等角度提升无线供能通信原型系统的信息传输时延性能.

最后,在基站端与用户端相距 10 m 的室外场景下,图 15 展示了不同调制方式下用户端信息接收的星座图与平均信噪比. 在无线信息传输实验中,我们设置式(9)中的 $\lambda = 20$. 为估计用户端接收到的信噪比,基站端发送已知信息(参考信号)到用户端,用户端利用实际接收到的信息以及其与已知信息的差值,估计噪声功率并计算平均信噪比 $\overline{\text{SNR}}$. 根据 5.1 节的自适应调制方案,基站端自适应地选择调制方法发送信息. 从图 15 可以观察到,用户端接收到的平均信噪比都较高,足以

支撑高阶的信息调制方法. 无论是采用哪种调制方式, 用户端均衡后的信息都很好地聚集在相应不同的象限. 因此, 虽然上位机的处理延迟会导致基站端从寄存器中获取的预编码矩阵不能最优适配当前的信道, 但仍然能适应信道状态的变化, 获得了较好的能量可持续的信息传输性能.

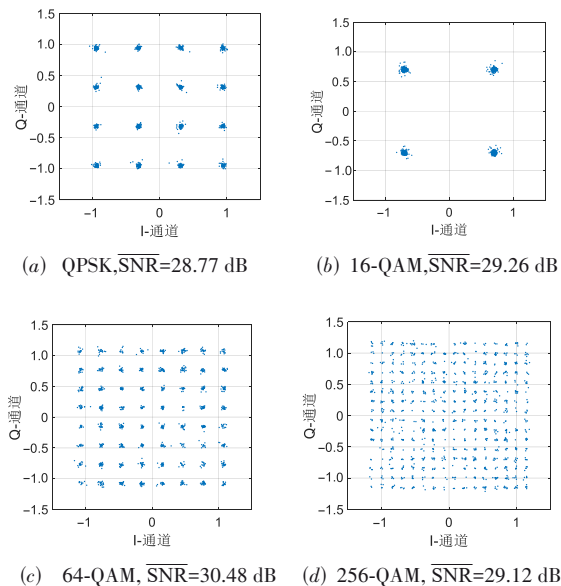


图 15 用户端信息接收星座图与平均信噪比

7 结论

无线供能通信技术是支撑未来 6G 时代能量可持续无线通信的关键技术, 有着广泛的应用前景. 作为无线供能通信原型系统设计与落地实现的探索性工作, 本文根据大规模天线无线供能通信系统的传输特点和需求, 首次提出闭环控制的无线供能通信系统的原型设计, 并在软件无线电定义的硬件平台上实现了配置 32 发射天线阵列的原型系统. 为支撑高效率的无线能量传输, 通过设计灵活的帧结构, 我们原创性地提出无线能量动态传输方案. 在此基础上, 通过融合无线能量和无线信息传输, 我们提出了新颖的自适应无线能量和信息传输框架和完整算法流程. 丰富的室内和室外实验都充分验证了我们设计的原型系统良好的自适应无线能量和无线信息传输性能.

参考文献

- [1] SAAD W, BENNIS M, CHEN M Z. A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems[J]. IEEE Network, 2020, 34(3): 134-142.
- [2] BI S Z, ZENG Y, ZHANG R. Wireless powered communication networks: An overview[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(2): 10-18.
- [3] LIU L, ZHANG R, CHUA K C. Multi-antenna wireless powered communication with energy beamforming[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(12): 4349-4361.
- [4] ZHANG R, HO C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5): 1989-2001.
- [5] WU Q Q, TAO M X, KWAN NG D W, et al. Energy-efficient resource allocation for wireless powered communication networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(3): 2312-2327.
- [6] 崔苗, 喻鑫, 李学易, 等. 多载波无线携能通信的上下行链路联合资源分配[J]. 通信学报, 2019, 40(3): 206-214. CUI M, YU X, LI X Y, et al. Joint downlink and uplink resource allocation for multi-carrier SWIPT system[J]. Journal on Communications, 2019, 40(3): 206-214. (in Chinese)
- [7] CHE Y, et al. Spatial throughput maximization of wireless powered communication networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(8): 1534-1548.
- [8] LI X, LIU F. Integrated sensing, communication, and computation over-the-air: MIMO beamforming design[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(8): 5383-5398.
- [9] Mi air charge Technology[OL]. [2021-04-20]. <https://www.mi.com/global/discover/article?id=1653>.
- [10] CHOI K W, AZIZ A A. Distributed wireless power transfer system for Internet of Things Devices[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(4): 2657-2671.
- [11] KIM J, CLERCKX B, MITCHESON P D. Signal and system design for wireless power transfer: Prototype, experiment and validation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(11): 7453-7469.
- [12] MALKOWSKY S, Vieiraet J, LIU L, et al. The world's first real-time testbed for massive MIMO: Design, implementation, and validation[J]. IEEE Access, 2017, 5: 9073-9088.
- [13] BJÖRNSON E, LARSSON E G, MARZETTA T L. Massive MIMO: Ten myths and one critical question[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(2): 114-123.
- [14] CHE Y, LAI Y, LUO S, et al. UAV-aided information and energy transmissions for cognitive and sustainable 5G networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(3): 1668-1683.
- [15] CLERCKX B, ZHANG R. Fundamentals of wireless information and power transfer: From RF energy harvester models to signal and system designs[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(1): 4-33.

- [16] HEATH R W, HONIG M, NAGATA S, et al. LTE-advanced pro: Part 1[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 52-53.
- [17] LU X, NI L, JIN S, et al. SDR implementation of a real-time testbed for future multi-antenna smartphone applications[J]. IEEE Access, 2017, 5: 19761-19772.
- [18] OZDEMIR M K, ARSLAN H, ARVAS E. Toward real-time adaptive low-rank LMMSE channel estimation of MIMO-OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(10): 2675-2678.
- [19] ZHANG R, HO C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5): 1989-2001.
- [20] ALEVIZOS P N, BLETSAS A. Sensitive and nonlinear far-field RF energy harvesting in wireless communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(6): 3670-3685.
- [21] LIN S, ZENG Y, GONG Y. Modulation recognition using signal enhancement and multistage attention mechanism[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(11): 9921-9935.
- [22] 杜永文, 练云翔, 冯珂. 基于 TinyOS 的传感器节点能耗仿真研究[J]. 自动化仪表, 2018, 39(1): 96-99.
DU Y W, LIAN Y X, FENG K. Research on the energy consumption simulation of sensor nodes based on TinyOS [J]. Process Automation Instrumentation, 2018, 39(1): 96-99. (in Chinese)
- [23] 王海东, 刘云敬, 康琳. 射频能量捕获传感网移动能量源的布置策略研究[J]. 电子学报, 2020, 48(12): 2367-2375.
WANG H D, LIU Y J, KANG L. Study on effective placement algorithm for energy transmitter in RF energy harvesting wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(12): 2367-2375. (in Chinese)
- [24] CHOI K W, ROSYADY P A, et al. Theory and experiment for wireless-powered sensor networks: How to keep sensors alive[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(1): 430-444.

作者简介



车越岭 女, 1984年2月生, 四川南充人。现为深圳大学计算机与软件学院副教授、硕士生导师。主要研究方向为无线通信系统和无线网络。
E-mail: yuelingche@szu.edu.cn



李梁柱 男, 1998年10月生, 安徽滁州人, 毕业于深圳大学计算机与软件学院计算机技术专业。研究方向为无线通信系统。
E-mail: 2070276147@email.szu.edu.cn



曾志豪 男, 1998年7月生, 广东中山人。现为深圳大学计算机与软件学院硕士研究生。研究方向为无线通信系统。
E-mail: 2110276238@email.szu.edu.cn



罗胜(通讯作者) 男, 1986年7月生, 四川巴中人。现为深圳大学计算机与软件学院助理教授、硕士生导师。主要研究方向为无线通信系统和基于人工智能的下一代通信网络。
E-mail: sluo@szu.edu.cn



伍楷舜 男, 1985年1月生, 广东广州人。现为深圳大学计算机与软件学院特聘教授, 博士生导师。主要研究方向为移动计算和无线感知。
E-mail: wu@szu.edu.cn