

部分自供电的非正交多址接入技术

Partially Self-Powered Non-Orthogonal Multiple Access Technology

龚杰/GONG Jie
陈翔/CHEN Xiang

(中山大学, 广东 广州 510006)
(Sun Yat-Sen University, Guangzhou
510006, China)

随着科技的发展,信息技术已渗透到社会的各个方面,并逐渐改变着人们的生产和生活方式。物联网(IoT)利用多种通信技术使机器互联,实现自动化、智能化的信息获取与网络监控控制,使人们从重复的工作中解放出来。然而,为了获得足够的系统状态信息,实现智能化精细控制,需要部署大量的物联网节点。这将带来2个重要问题:(1)由于电网布线困难,物联网节点一般采用电池供电,因此能量受限;(2)无线频谱资源紧缺,难以支持海量无线节点同时接入。近年来受到关注的无线能量传输(WPT)技术,是解决物联网节点能量受限问题的有效方法;而非正交多址接入(NOMA)技术通过在同一资源块上同时承载多个用户,能有效缓解频谱资源紧缺的问题。因此,这2种技术的有机结合,是实现物联网可持续运行以及海量设备同时接入的重要手段。

文中我们基于现实,提出一种部分自供电的NOMA技术框架,使得近

收稿日期: 2018-07-20
网络出版日期: 2018-09-18
基金项目: 国家自然科学基金(61771495)、国家重点研发计划(2017YFE0112600)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0024-004

摘要: 提出了一种部分自供电的非正交多址接入(NOMA)技术框架,将NOMA和无线能量传输(WPT)技术有机结合起来,并利用频谱复用和近场传输,实现高效的WPT和多用户接入。这一框架可以应用在上行反馈、中继传输、信息解码等多种数据传输场景。讨论了部分自供电NOMA技术的科学问题,并对信息解码能量受限的两用户系统可达速率进行了初步分析。

关键词: NOMA; WPT; 连续干扰消除

Abstract: In this paper, a partially self-powered non-orthogonal multiple access (NOMA) frame work by combining the NOMA and wireless power transfer (WPT) technologies is proposed. With the high spectral efficiency and short distance transmission, partially self-powered NOMA can achieve high efficiency in wireless energy harvesting and multiple user data transmission. It can be used for uplink information feedback, relay transmission, information decoding and etc. Then the potential research directions on this topic is discussed, and the achievable rate region of a two user system as preliminary results is analyzed.

Keywords: NOMA; WPT; successive interference cancellation

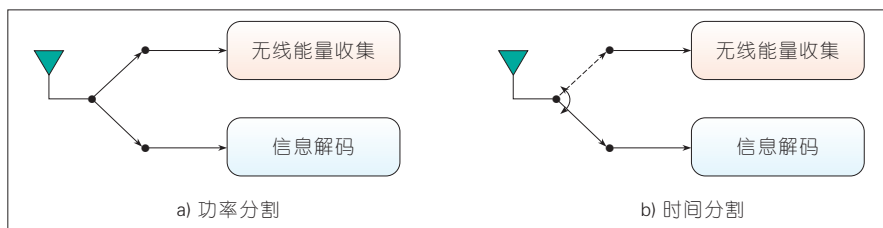
距离用户在保证信息传输的同时,可以高效地获取无线能量,并用于更多的信息处理与传输任务。这一框架可以应用于信息解码、中继传输、上行反馈等多种场景,具有广泛的应用前景。

1 部分自供电的NOMA技术的概念与现状

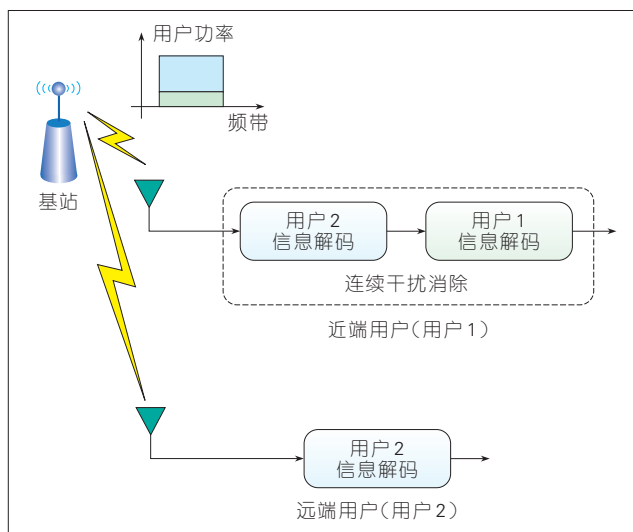
WPT技术是指在接收无线信号的同时,通过采集无线射频中的能量以获得电力^[1]。通常有2种接收电路设计(如图1所示):功率分割^[2]和时间分割^[3]。所谓功率分割,是将接收到的无线信号分成2路,一路用来进行信息的解调,一路用来采集电量。而时间分割则是通过时分的方式,部分时间接收信息,部分时间采集能量。WPT具有2个特点:一是能量源

是可控的,可以通过调节发射功率,控制所能采集的能量;另一个特点是相对于信息接收,能量采集不区别有用信号和干扰信号,因此在强干扰环境下往往能采集更多的能量^[4-5]。然而其缺陷也很明显,由于无线信号的发散特性以及信道的衰落特性,接收端能采集到的无线能量往往很少,WPT效率很低,尤其是当传输距离较远时,甚至无法获得足够的能量。以1 W的发射功率为例,路径损耗模型采用 $PL_{dB} = 30.8 + 24.2 \log_{10}(d)$,可以计算得到:当 $d = 1$ m时,接收信号强度就只有0.83 mW,加上能量采集中的电路消耗,能量传输效率非常低。

NOMA技术的基本原理如图2所示,在同一频带中同时发送2个用户的信息:一个近端用户,一个远端用户。利用信号功率的不同,近端用户



▲图1 无线能量传输接收端电路结构示意图



◀图2 非正交多址接入技术原理图

采用连续干扰消除(SIC)技术先解出强干扰信号,从接收信号中减去干扰信号之后再解出自身信息,从而实现非正交的频谱复用。NOMA技术首先由Saito等人提出^[6],并进行了深入的系统级仿真^[7],验证了这一技术在网络容量和小区边缘用户吞吐量方面,相较于传统的正交多址接入有相当明显的性能提升。由此,NOMA技术受到了人们的广泛关注。文献[8]在上行非正交多址中提出了一种新的子载波和功率联合分配方案,以最大化用户的和速率;文献[9]从用户公平性角度重新设计了功率分配算法;文献[10]分析了用户配对方案对系统性能的影响。在NOMA技术中,由于近端用户解出了远端用户的信号,还可以作为中继节点,协助远端用户的信号接收^[11]。

2 部分自供电的NOMA接入技术的框架

通过前面的讨论我们知道:WPT

技术在实际应用中受到距离的严格限制;而NOMA技术则给WPT提供了天然的应用场景,当近端用户离发射端很近时,可以在接收信息的同时采集能量。而且,由于在同一频段叠加了多用户信息和能量,而能量采集不区分有用信号和干扰,近端用户可以采集足够的无线能量。基于此,我们

提出部分自供电的NOMA技术框架,如图3所示。这一框架包括3个基本模块:

(1)发射端。在同一频段上用不同的功率叠加多个用户的信息,同时发送给多个用户。这一模块与传统的NOMA系统相同。

(2)近端用户。自供电用户,利用近距离接收信号功率大,分割一部分接收能量进行无线能量采集,采集到的能量可用于多种用途,另一部分通过连续干扰消除进行信息解码。根据信息解码和能量采集的需求,通过调节2部分的功率比例,以实现不同的功能。

(3)远端用户。普通用户,由电池或其他方式供电,与传统的NOMA系统相同,从无线接收信号中解码得到有用信息。

从上述框架中可以看到:相比于传统的NOMA技术,近端用户具有了无线能量采集功能,使得整个系统可以采取部分自供电(近端用户)的方式,为系统的设计提供了便利,也可以应用到更多、更广的领域。根据无线能量的用途,部分自供电的NOMA技术有以下可能的应用场景:

(1)上行反馈。近端用户利用采集到的无线能量进行短距信息上传,典型的应用场景为射频识别(RFID)。我们在非正交多址的框架

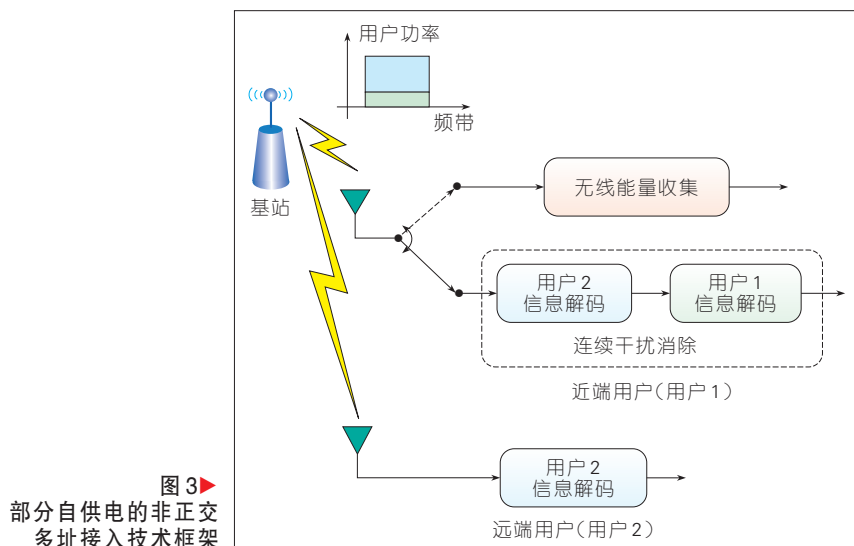


图3▶ 部分自供电的非正交多址接入技术框架

下,可以进行有效的频谱复用,并支持多用户下行传输和上行信息反馈。

(2)信息解码。在实际中,数据的解码也需要消耗能量^[12],当解码的过程较复杂时(如连续干扰消除),解码能耗会很大。实现近端用户的自供电,首先需要用采集的无线能量满足解码的需求。

(3)中继传输。近端用户一方面采集了无线能量,另一方面在连续干扰消除过程中对远端用户的数据进行了解码。因此,可利用采集的能量发送这部分数据,通过中继的方式提高远端用户的信噪比。基于WPT的协作中继已有些初步研究工作^[13-14],在直射链路有遮挡的情况下作用十分明显^[15]。

3 部分自供电的 NOMA 技术的问题及研究方向

部分自供电的 NOMA 有效地结合了 WPT 和 NOMA 2 个技术,具有实际的应用前景。然而,这一框架还存在着很多待解决的问题,由这些问题引出了未来的研究方向。

(1)能量采集与信息接收的折中。由于在接收到无线电波后且解码之前,有用信号和干扰信号无法区分开,因此,无线能量采集势必造成信息接收的性能损失,即接收信号强度减弱。如何取得 2 部分的最优折中,以满足实际应用的需求,是首先需要解决的一个问题,也是 WPT 领域的基本问题之一。在 NOMA 场景下,近距传输的高能量接收信号使得能量分配有更大的自由度,但同时信息接收的复杂度也会增高。

(2)多天线设计与多用户支持。无论是在 WPT 中,还是在 NOMA 里,利用多天线波束赋形进行无线电波定向传输,都是颇具吸引力的一种设计思路。这种设计可大幅度提高传输效率,但也增加了波束赋形设计的复杂度。在多用户场景下,多波束设计和用户配对问题有待进一步考虑。从能量的角度,每个用户希望收

到尽可能多的无线电波;而从信息的角度,用户希望干扰越小越好。因此,多用户波束设计中需要考虑两者的折中。

(3)非理想因素的影响。考虑到信道信息训练和反馈,无线能量还需要满足这部分的能量消耗。在多天线场景下的信道信息训练和反馈开销很大,通常无法忽略。近端用户由于距离太近,其信道特性会有所不同,如何进行建模和训练,也是一个很有意义的问题。

4 部分自供电的 NOMA 技术中两用户系统可达速率初探

我们研究如图 3 所示的两用户 NOMA 系统的可达速率。其中,近端用户完全由采集的无线能量给解码模块供电,因此需要保证足够的电量采集。考虑一种混合的能量采集协议:每个时隙分成 2 个子时隙,第 1 个子时隙仅发送远端用户(用户 2)的信息,此时近端用户(用户 1)完全采集能量;第 2 个子时隙发送两用户叠加信息,用户 1 根据能量需求进行功率分割。每个子时隙中均需要满足发射功率约束和传输速率约束,具体来说,在第 1 个子时隙中,由于只发送用户 2 的信息,用户 1 的功率为零,因此功率约束为:

$$P_2^{(0)} \leq P_{\max}, \quad (1)$$

其中功率下标表示用户,上标表示子时隙。传输速率约束为:

$$R_2^{(0)} \leq \log_2 \left(1 + \frac{|h_2|^2 P_2^{(0)}}{\sigma^2} \right), \quad (2)$$

其中 $|h_1|$ 为用户 2 的信道增益, σ^2 为噪声功率。

在第 2 个子时隙中,两用户的信号受到总功率限制为:

$$P_1^{(2)} + P_2^{(2)} \leq P_{\max}, \quad (3)$$

设用户能量采集的信号比例为 ρ 。由于非正交多址的技术特点,用

户 1 可完全消除干扰信号,因此其传输速率约束为:

$$R_1^{(2)} \leq \log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 (1-\rho) P_1^{(2)}}{\sigma^2} \right). \quad (4)$$

对于用户 2 来说,其速率受 2 方面约束。首先,为了保证用户 1 能完全消除用户 2 的干扰,用户 2 的速率不能超过用户 1 对用户 2 信息解码的能力范围,即:

$$R_2^{(2)} \leq \log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 (1-\rho) P_2^{(2)}}{|h_1|^2 (1-\rho) P_1^{(2)} + \sigma^2} \right). \quad (5)$$

其次,用户 2 自身的信息解码也受到信道容量限制,即:

$$R_2^{(2)} \leq \log_2 \left(1 + \frac{|h_2|^2 P_2^{(2)}}{|h_2|^2 P_1^{(2)} + \sigma^2} \right). \quad (6)$$

最后,由于用户 1 是一个自供电系统,采集的能量应不低于消耗的能量。设第 1 个子时隙的时间占比为 t ,信息解码的功耗为 P_{sc} ,则有:

$$t\varepsilon|h_1|^2 P_2^{(0)} + (1-t)\rho\varepsilon|h_1|^2 (P_1^{(2)} + P_2^{(2)}) \geq (1-t)P_{sc}, \quad (7)$$

其中 ε 为无线能量转化效率。为了刻画两用户系统的可达速率区域,我们求解以下问题:在上述约束下,给定其中一个用户的速率,最大化另一个用户的速率。这个问题其实可以建模为:

$$\begin{aligned} \max & tR_2^{(0)} + (1-t)R_2^{(2)} \\ \text{s.t.} & (1-t)R_1^{(2)} = r \end{aligned}, \quad (8)$$

即给定用户 1 的速率 r ,最大化用户 2 的速率。

可以证明:上述问题是一个凸优化问题,可以用凸优化理论有效地求解。通过遍历所有可能的 r 值,可以刻画出两用户的可达速率区域。图 4 给出了一组参数下的结果。图中 4 条曲线分别代表传统的功率分割技术、时间分割技术、我们提出的混合能量采集协议,以及时分多址(TDMA)。比较这几条曲线,我们所提的混合协议能获得最大的可达速

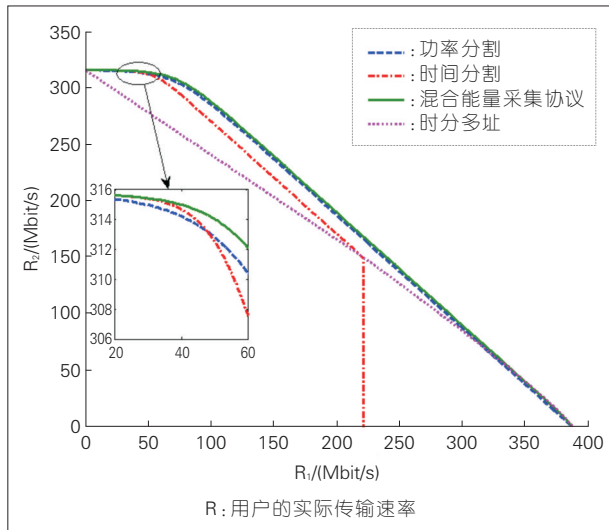


图4
两用户部分自供电非正交多址接入系统可达速率

率域。实际上,混合协议包含了传统的功率分割和时间分割,因此这一结果是自然的。在时间分割技术的曲线上我们发现:速率2在约220 Mbit/s时突然降为0。其原因在于:为了保证有足够的能量,第1个子时隙的长度有一个非零下界,低于这个下界系统将无法工作。

在上述问题中,当 $\rho=0$ 或者 $t=0$ 时,退化到传统的时间分割和功率分割问题。这两种特殊情况可以得到闭式的可达速率域。为了得到更大的可达速率域,可以根据传输速率动态调节解码能耗。这些问题的具体分析参见文献[16]。

5 结束语

本文所提出的部分自供电的 NOMA 框架,结合了 NOMA 技术和 WPT 技术的特点和优势,可广泛应用于能量受限的多用户系统。这一框架的实现仍有很多技术难点有待攻克。在解码能量受限的两用户系统分析中,我们所提出的混合能量采集协议可以得到比传统时间分割或功率分割更大的可达速率域。

参考文献

[1] ZHANG R, K HO C. MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5): 1989–2001. DOI: 10.1109/

TWC.2013.031813.120224
[2] LIU L, ZHANG R, CHUA K C. Wireless Information and Power Transfer: A Dynamic Power Splitting Approach [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(9): 3990–4001. DOI: 10.1109/TCOMM.2013.071813.130105
[3] ZHOU X, ZHANG R, HO C K. Wireless Information and Power Transfer: Architecture Design and Rate–Energy Tradeoff [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(11): 4754–4767. DOI: 10.1109/TCOMM.2013.071813.130105
[4] PARK J, CLERCKX B. Joint Wireless Information and Energy Transfer in a Two–User MIMO Interference Channel [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(8): 4210–4221
[5] LEE S, LIU L, ZHANG R. Collaborative Wireless Energy and Information Transfer in Interference Channel [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(1): 545–557. DOI: 10.1109/TWC.2014.2354335
[6] SAITO Y, KISHIYAMA Y, BENJEBBOUR A. Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access[C]// IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC Spring), Jun. 2013, pp. 1–5
[7] SAITO Y, BENJEBBOUR A, KISHIYAMA Y, et al. System Level Performance Evaluation of Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)[C]// 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE: USA, 2013: 611–615. DOI: 10.1109/PIMRC.2013.6666209
[8] AI-IMARI M, XIAO P, IMRAN M A, et al. Uplink Nonorthogonal Multiple Access for 5G Wireless Networks[C]// 2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS). IEEE: USA, 2014:781–785. DOI: 10.1109/ISWCS.2014.6933459
[9] TIMOTHEOU S, KRKIDIS I. Fairness for Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(10):1647–1651. DOI: 10.1109/LSP.2015.2417119
[10] DING Z, FAN P, POOR H V. Impact of User

Pairing on 5G Nonorthogonal Multiple–Access Downlink Transmissions [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 65(8): 6010–6023. DOI: 10.1109/LSP.2015.2417119

- [11] DING Z, PENG M, POOR H V. Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems [J]. IEEE Communication Letters, 2015, 19(8):1462–1465. DOI: 10.1109/LCOMM.2015.2441064
[12] ZHOU S, CHEN T, CHEN W, et al. Outage Minimization for A Fading Wireless Link with Energy Harvesting Transmitter and Receiver [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(3): 496–511
[13] LIU Y, DING Z, ELKASHLAN M, et al. Cooperative Nonorthogonal Multiple Access with Simultaneous Wireless Information and Power Transfer [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(4): 938–953. DOI: 10.1109/JSAC.2016.2549378
[14] XU Y, SHEN C, DING Z, SUN X, et al. Joint Beamforming Design and Power Splitting Control in Cooperative SWIPT NOMA Systems[C]// IEEE Transactions on Signal Processing. USA: IEEE, 2017:4847–4886. DOI: 10.1109/TSP.2017.2715008
[15] LIU L, ZHANG Z, SHEN C, et al. Wireless Powered Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access Transmission[C]// IEEE ICC Workshops. USA: IEEE, 2018
[16] GONG J, CHEN X. Achievable Rate Region of Non-Orthogonal Multiple Access Systems with Wireless Powered Decoder [C]// IEEE Journal on Selected Areas in Communications. USA:IEEE, 2017, 35(12): 2846–2859. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2726242

作者简介



龚杰,中山大学数据科学与计算机学院副教授;主要研究方向为绿色通信与网络、移动缓存与边缘计算、无人机通信等;先后主持2项国家自然科学基金项目,参加多项国家自然科学基金和科技部项目;已发表论文50余篇,其中SCI检索论文20余篇。



陈翔,中山大学电子与信息工程学院副教授;主要研究方向为5G移动通信与物联网、移动大数据、卫星通信等;先后主持国家级省部级科研项目10余项;已发表论文80余篇,其中SCI检索论文30余篇,申请并获得授权发明专利30余项。