

非正交多址接入的关键技术研究

Key Technologies for Non-Orthogonal Multiple Access

肖可鑫/XIAO Kexin
夏斌/XIA Bin
陈智勇/CHEN Zhiyong

(上海交通大学, 上海 200240)
(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai
200240, China)

移动互联网、社交网络和物联网的蓬勃发展, 对未来移动网络提出了更高的要求。爆发式增长的数据流量给有限的频谱资源带来了极大的挑战; 同时, 随着物联网的快速发展, 第5代移动通信(5G)急需解决海量终端同时可靠接入的问题。

为提高无线通信系统的用户容量/数量, 一个常规办法是增加系统的资源, 如更多的频谱资源、更大的发射功率资源、更密集的小区数目和更多的传输天线等空间维度的资源。但因频谱资源稀缺, 低无线辐射要求, 小区站址有限且难以增加, 以及天线物理实现复杂等而面临严峻挑战。另一个方法则是从多址接入技术入手, 通过优化现有多用户分享资源的方式获得系统可同时支持用户数量的提升。多址接入技术在无线通信领域具有至关重要的研究意义, 其技术手段随着通信产业的发展而不断更新换代。目前多址接入技术分为正交多址(OMA)和非正交多

收稿时间: 2017-04-11

网络出版时间: 2017-05-05

基金项目: 中国科学院无线传感网与通信重点实验室开放课题(课题编号: 2015002); 国家重点研发计划项目(课题编号: 2016YFE0121100)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 03-0006-005

摘要: 从负载能力、接收机复杂度、编码方式等方面对比了3种典型的非正交多址接入(NOMA)技术, 并通过仿真验证了其传输可靠性。仿真结果显示: 稀疏编码多址接入(SCMA)具有最好的误码性能, 而多用户共享接入(MUSA)和图样分割多址接入(PDMA)的误码性能相似。此外, 还指出了NOMA技术的未来研究方向。

关键词: NOMA; SCMA; MUSA; PDMA

Abstract: In this paper, three dominant non-orthogonal multiple access (NOMA) schemes are compared, including sparse code multiple access (SCMA), multi-user shared access (MUSA) and pattern division multiple access (PDMA). And the transmission reliability of NOMA schemes are corroborated through the simulation experiments. It shows that SCMA outperforms the other schemes in terms of bit error rate (BER) while MUSA and PDMA achieve almost the same BER results. Moreover, the future research direction of NOMA is also pointed out in the end.

Keywords: NOMA; SCMA; MUSA; PDMA

址(NOMA)两类。常用的频分多址(FDMA)、时分多址(TDMA)等OMA方案可以保证不同用户信号间严格的正交性, 避免多址干扰。但是正交方案也存在频谱效率偏低的劣势, 虽然正交方案中的正交频分多址(OFDMA)技术可以利用重叠子载波的方法提高频谱效率, 其依然很难达到最大香农容量界, 需要通过在相同的时频资源上给不同用户分配非正交的波形来达到更大的容量^[1]。结合先进的多用户检测技术, NOMA可以在有效提高频谱效率的同时, 容纳更多的接入用户。

近年来的NOMA接入技术在理论研究和实现技术等方面不断前进, 取得了一些阶段性成果。大部分都集中在稀疏扩频码分多址(LDS)^[2]、稀疏编码多址(SCMA)技术^[3-6]、多用户共享接入(MUSA)^[7]、图样分割多址

接入(PDMA)^[8-11]等技术研究。NOMA接入技术由于可支持用户数量远大于以往码分多址(CDMA)这类OMA技术的用户数量, 且能部分获得之前OMA技术所忽略的编码增益, 被视为未来支持海量移动终端的候选技术之一。

1 SCMA

1.1 系统模型

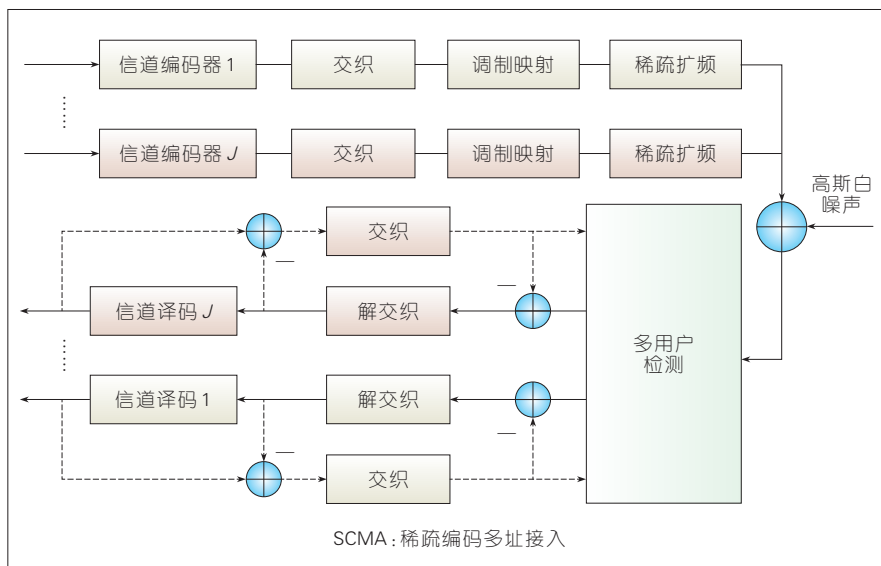
SCMA接入技术包含两类主要技术: LDS和SCMA。LDS是一种特殊的CDMA, 其特殊之处在于LDS的扩频码字中存在一部分0元, 使得在接收端能够采用低复杂度的解调算法。一个CDMA编码器利用正交码字将正交幅度调制(QAM)符号扩展成复数符号序列, 因此CDMA调制器可以看作是二进制比特映射成复数域

符号序列的过程。从这个角度来看,不同于 LDS 的是,SCMA 将 QAM 映射模块和 CDMA 编码模块有机地结合在一起,直接将比特序列(向量)映射成发送复符号序列(向量)。正是这种高维码本的设计使得 SCMA 可以获得星座的成形增益。整个过程可以描述成一个从二进制域到高维复数域的编码过程,如图 1 所示。也就是说 SCMA 在发送端将编码比特直接映射为复数域的多维码字,不同用户的码字在相同的时频资源上以扩频的方式非正交叠加。同时在接收端,对于 SCMA 的扩频是稀疏的,它可以采用低复杂度的消息传递算法(MPA)去近似最优的最大后验多用户检测,从而可以可靠的对非正交用户进行译码。这种扩频会使得系统得到扩频增益/分集增益,使链路有更好的性能。

1.2 技术特点

首先,SCMA 的码本能够灵活地设计。SCMA 码本灵活设计的好处在于,未来不同的系统场景会有不同的系统性能要求,SCMA 码本设计提供了非常丰富的优化维度,包括:码字数量、扩频长度以及非零码字的个数。这样就可以从覆盖、连接数,以及容量等一些不同的系统衡量维度,针对不同场景进行设计。对于覆盖要求高的场景,如语音业务,我们可以使这些用户连接到更多的资源块上,增加码本中非零元素的个数,这样做可以使得系统的误码率得到降低,并且整个系统可容纳的用户数也将提高;对于连接性要求高的场景,如数据业务或者小包业务,不要求较低的误码率和抗干扰性,我们可以减少连接到资源块上的用户个数,降低码本中非零元素的个数,这样可以提高传输的速率,增强对于小包业务的支持。

其次,由于 SCMA 码字的稀疏性,接收端可以采用低复杂度算法,如利用 MPA 来近似解调各个用户的数



▲图 1 SCMA 的发送接收示意

据。由于 MPA 利用迭代求解,可以利用迭代特性,结合信道编码实现 Turbo 译码,在提高性能的同时把解调复杂度控制在一定范围内。

此外,SCMA 从平均能量效率角度来看,在高信噪比(SNR)条件下比增强长期演进(LTE-A)系统的平均能量效率高。由于 SCMA 具有正交性,能让更多的用户利用基站能量,因此用户数量大时比 OMA 接入能量效率更高。

2 MUSA

2.1 系统模型

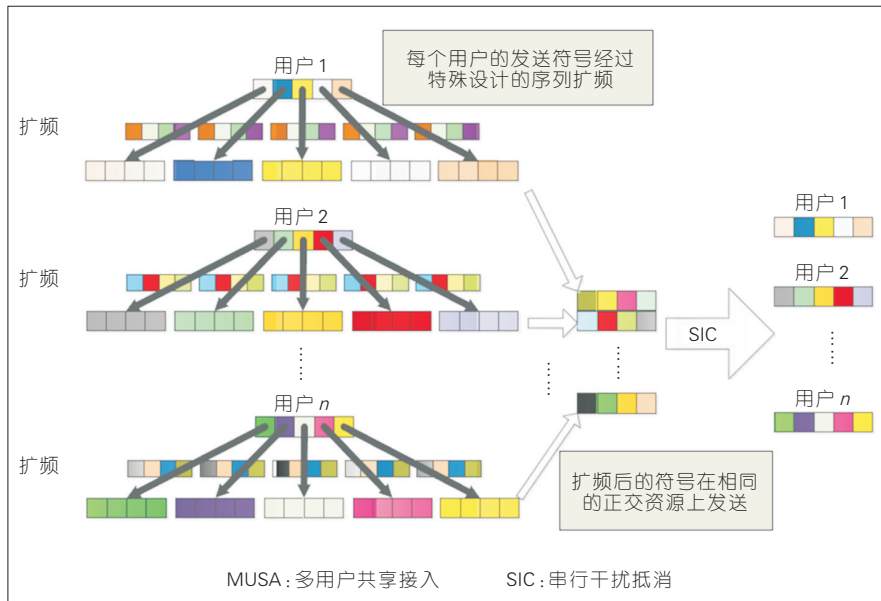
MUSA 是另外一种基于复数域多元码的上行 NOMA 接入技术,适用于免调度的多用户共享接入方案,非常适合低成本、低功耗实现 5G 海量连接。MUSA 原理如图 2 所示。首先,各接入用户使用易于串行干扰抵消(SIC)接收的,具有低互相关性的复数域多元码扩频序列,将其调制符号进行扩展;然后,各用户扩展后的符号可以在相同的时频资源里发送;最后,接收侧使用线性处理加上码块级 SIC 来分离各用户的信息。扩展序列会直接影响 MUSA 的性能和接收机复杂度,是 MUSA 的关键部分。如果

像传统直接序列码分多址(DS-SS) (如 IS-95 标准)那样使用很长的伪随机(PN)序列,那序列之间的低相关性是比较容易保证的,而且可以为系统提供一个软容量,即允许同时接入的用户数量(即序列数量)大于序列长度,这时系统相当于工作在过载的状态。我们将同时接入的用户数与序列长度的比值称为负载率,负载率大于 1 即为过载。

长的 PN 序列虽然可以提供一定的过载容量,但是在 5G 海量连接这样的系统需求下,系统过载率往往是比较大的,在大过载率的情况下,采用长 PN 序列常常使得串行干扰抵消过程复杂和低效。在上行链路中,MUSA 使用特殊设计的复数域多元码(序列)来作为扩展序列,此类序列即使很短(往往小于 10 个码片),也能保持相对较低的互相关。例如,其中一类 MUSA 复数扩展序列,其序列中每一个复数的实部\虚部取值于一个多元实数集合。甚至一种非常简单的 3 元 MUSA 扩展序列,其每一个码片元素取值于一个简单 3 元集合 $\{-1,0,1\}$,也能取得相当优秀的性能。

2.2 技术特点

由于 MUSA 采用复数域的多元扩



▲图2 MUSA上行多址接入方案^[9]

频码序列,同时在接收端采用先进的SIC接收机,MUSA可以支持相当多的用户在相同的时频资源上共享接入,并逼近多址接入信道的容量域边界。在上行场景中,这些大量共享接入的用户都可以通过随机选取扩展序列,然后将其调制符号扩展到相同时频资源的方式来实现。MUSA可以让大量共享接入的用户随机发送,无数据时则深度睡眠,而不需要先通过资源申请、调度、确认等复杂的控制过程才能接入。这个免调度过程在海量连接场景尤为重要,能极大减轻系统的信令开销和实现难度。同时,MUSA可以放宽甚至免除严格的上行同步过程,只需要实施简单的下行同步。最后,存在远近效应时,MUSA还能利用不同用户到达SNR的差异来提高SIC分离用户数据的性能,即也能如传统功率域NOMA那样,通过对强信道用户先解码来消除其对另一个用户造成的干扰。从另一角度看,这样可以减轻甚至免除严格的闭环功率控制过程。所有这些为低成本、低功耗实现海量连接提供了坚实的基础。

从5G海量连接的角度,对MUSA和传统功率域NOMA做一些比较:首

先,NOMA不需要扩频,而MUSA上行非正交扩频即使实部和虚部都限制在最简单的3值集合 $\{-1,0,1\}$,也可以有足够多的低互相关码;其次,两者都使用干扰消除技术,但NOMA不适合免调度场景,MUSA适合免调度场景(利用扩频码的随机性去估计用户接入情况的稀疏向量);最后,在免调度场景下,NOMA的分集增益不如MUSA。

3 PDMA

3.1 系统模型

图样分割多址接入技术是基于发送端和接收端的联合设计的新型NOMA技术。在发送端,在相同的时、频域资源内,将多个用户信号进行功率域、空域、编码域的单或联合编码传输;在接收端,采用SIC接收机算法进行多用户检测,逼近多用户通信的信道容量域。

PDMA的基本原理可以用等效分集度来进行解释。按照垂直贝尔实验室空时结构(V-BLAST)系统的理论,第*i*层干扰抵消能够获得的等效分集度 $N_{div} = N_R - N_T + i$,其中 N_R 表示接收分集度, N_T 表示发送分集度^[8]。

对于使用SIC方式进行检测的NOMA接入系统,因各个用户处于不同的检测层,为了保证多用户在接收端检测后能够获得一致的等效分集度,就需要在发送端为多用户设计不一致的发送分集度。如图3所示,发送分集度可以灵活地在功率、空间、编码等多种信号域进行构造。

在发送端,多个用户采用适宜干扰抵消接收机算法的特征图样进行区分,PDMA进行多用户图样设计时,针对不同信号域特征采用不同的方式。在进行功率域图样设计时,会增加功率和相位旋转因子;在进行空域图样设计时,会在多天线上进行天线映射,并与预编码矩阵进行结合,如图4所示;在进行编码域图样设计时,会基于编码矩阵考虑不同延迟的信道编码等。在接收端,对多用户采用低复杂度、高性能的SIC算法实现多用户检测。与该技术框架相对应,相对于正交系统,PDMA在发送端增加了图样映射模块,在接收端增加了图样检测模块。

PDMA的接收端分为两个部分,分别是前端检测模块和基于SIC的检测模块。其中,前端检测模块包含特征图样模式配置解析模块、功率图样提取模块、编码域图样提取模块和空间域图样提取模块。在特征图样模式配置解析模块通过控制信令控制不同图样提取模块。通过前端检测模块,可以提取出不同用户图样编码特征,然后采用低复杂度的准最大似然检测算法来实现多用户的正确检测接收。

3.2 技术特点

PDMA是一种新型NOMA接入技术,它充分利用多维度处理,从而具有使用范围更大,编译码灵活度高,处理复杂度较低等优点。PDMA能够普遍地应用于面向5G的典型场景,包括提升频谱效率、系统容量的连续广域覆盖、热点高容量场景,提升接入用户数,降低时延的移动物联网场

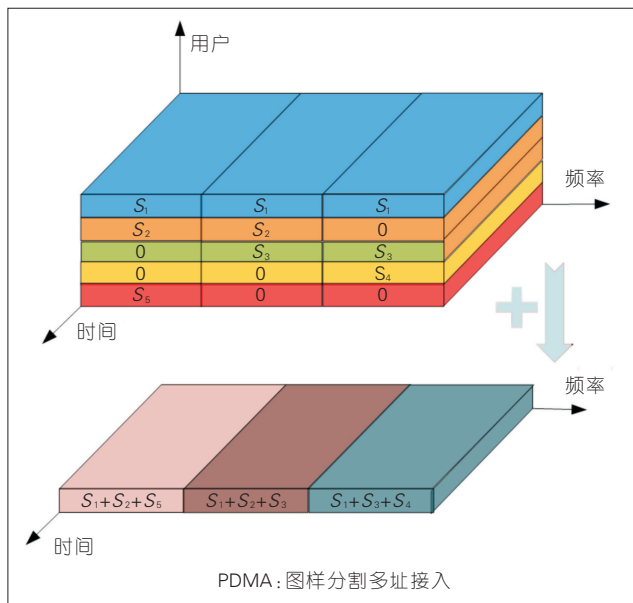


图3 PDMA 时频资源映射方式

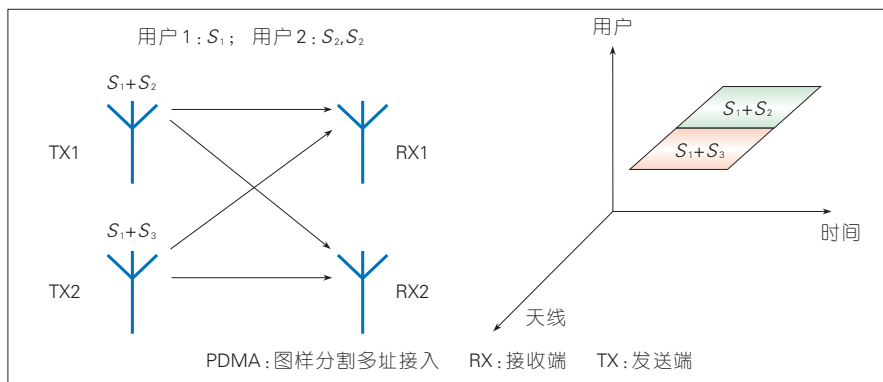


图4 PDMA 空域编码图样设计^[8]

景。PDMA 是一种提高频谱效率和增加接入用户数的有效技术。可以预见：在未来的 5G 标准化推动过程中，PDMA 技术将发挥重要贡献。

PDMA 考虑采用多个用户在相同资源上重叠发送，即采用 NOMA 接入方式，在接收端采用更复杂的检测算法来实现用户的正确检测。NOMA 接入技术的引入来源于器件的进步和非线性检测技术的发展。理论上，基于 SIC 的非线性多用户检测，无论在上行还是下行，都能够达到香农容量的极限。

以长期演进 (LTE) 正交方式作为参照，在相同时频资源上 PDMA 可以复用相对于正交方式不同倍数的用户，通常简称为系统负荷。无论从误

块率和吞吐量来看，PDMA 相比 LTE 正交都能有显著的增益，并且这种增益在低信噪比情况下更加明显。对于下行功率受限的系统，用户间的大尺度衰落差值对性能影响比较大，通常多用户功率差值越大，性能增益越明显。

4 技术特点分析和仿真性能对比

相对于 OFDMA 技术，NOMA 接入技术能够在系统容量和系统频谱效率上得到性能的增益。表 1 展示的是 3 种不同多址接入技术的特征和优劣势的比较。

通过仿真实验，我们可以对比这几种多址接入技术的误码性能。对

于仿真中，信道为瑞丽衰落信道，采用正交相移编码 (QPSK) 调制方式，6 个传输符号，4 个正交资源，过载因子为 150%。仿真的结果如图 5 所示。

从仿真的结果中可以看出，SCMA 有最好的误码率 (BER) 性能，这是由于 SIC 对系统的性能有较为剧烈的影响。另一方面，当 PDMA 采用和 SCMA 相同的因子图时，SCMA 的性能仍然好于 PDMA，原因在于 SCMA 有更接近最优的稀疏码字设计，更利于性能的提升。

5 结束语

综上所述，我们讨论分析了 3 种典型 NOMA 技术：SCMA、MUSA 和 PDMA，定性地阐述了 3 种系统的收发机理、系统模型以及关键特点，同时我们从负载能力、接收机复杂度、编码方式等方面对 3 种技术进行了横向地对比，并通过误码性能仿真验证了以上技术的传输可靠性。根据分析结果表示，得益于高维码本的优化设计和近似最优 MPA 的多用户检测，SCMA 展现出了最好的误码性能，而 MUSA 和 PDMA 具有十分相似的误码性能。更进一步，我们分析并指出了每种技术现存的问题以及未来的改进方向，例如 MC-LDSMA 系统的高维码本设计与低复杂度的 MPA 多用户检测的性能折中，MUSA 的低相关序列设计以及 PDMA 的非正交模式设计等。

通过对现有 NOMA 技术的对比分析，我们发现其仍然缺少足够的理论指引，同时相应的设计准则以及编码方案大多仅考虑理想的信道模型和固定的用户业务请求，这对于实际的资源调度和网络优化会造成一定程度的失配。我们将问题和展望总结如下：

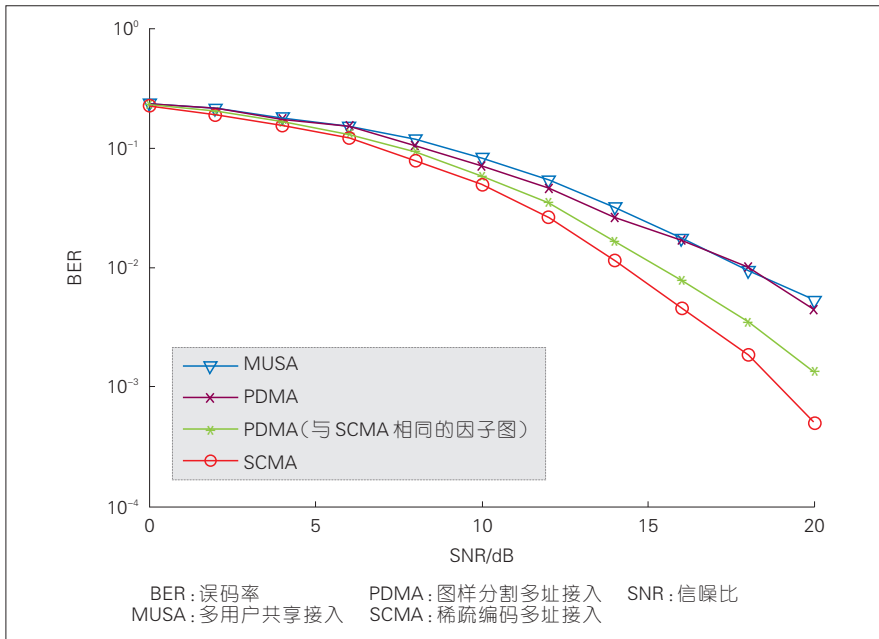
(1) 基于新型编码调制技术的 NOMA 网络的容量极限尚不明确。

(2) 现有部分 NOMA 是多用户区分机制未从理论上充分考虑编码增益、成形增益等增益挖掘；而最新考

▼表1 3种多址接入技术的特征比较

多址接入技术	关键技术	优势	劣势
SCMA	低密度传输;高维调制技术;通过MPA算法的迭代方式的接近最优检测。	提高频谱效率3倍以上;上行容量为OFDMA的2.8倍;下行小区吞吐率比OFDMA提升5%~8%。	很难实现并设计最优的编码;用户之间的干扰增加。
MUSA	SIC检测;复数域的多维编码;叠加编码和叠加符号传输。	低误块率;支持大用户数的接入;提升频谱效率。	用户之间的干扰增加;扩频序列的实现存在困难。
PDMA	整体设计SIC模式低复杂度类似ML-SIC检测。	上行系统的容量提升2~3倍;下行系统的频谱效率提升1.5倍。	设计和优化图样存在困难;用户之间的干扰增加。

ML-SIC:最大似然串行干扰消除 OFDMA:正交频分多址 SCMA:稀疏编码多址接入
 MUSA:多用户共享接入 PDMA:图样分割多址接入 SIC:串行干扰抵消



▲图5 瑞利衰落信道中SCMA、MUSA、PDMA的误码性能比较^[12]

考虑了编码增益的新型多维空间稀疏编码调制多址接入方案也仍尚缺理论上原理性的指导,亟需从理论上开展研究,提供相关设计准则和编码调制、多用户映射方案。且现有方案均未考虑成形损失而进行优化。

(3)网络资源分配和调度时未考虑网络拓扑、信道的随机性,以及用户业务接入请求的多样性和动态性。

参考文献

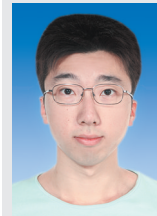
[1] COVER T M, THOMAS J A. Elements of Information Theory [M]. New York: Wiley, 2012

[2] HOSHYAR R, WATHAN F P, TAFAZOLLI R. Novel Low-density Signature for Synchronous CDMA Systems Over AWGN Channel [J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2008, 56(4):1616-1626. DOI: 10.1109/TSP.2007.909320.
 [3] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse Code Multiple Access [C]//in Proc. IEEE PIMRC, USA:IEEE, 2013:332-336. DOI:10.1109/PIMRC.2013.6666156
 [4] TAHERZADEH M, NIKOPOUR H, BAYESTEH A, et al. SCMA Codebook Design[C]//in Proc. IEEE VTC Fall, USA:IEEE, 2014:1-5. DOI: 10.1109/VTCFall.2014.6966170
 [5] ZHANG S, XIAO K, XIAO B, et al. A Capacity-based Codebook Design Method for Sparse Code Multiple Access Systems[C]//in Proc. IEEE WCSP, USA:IEEE, 2016:1-5. DOI: 10.1109/WCSP.2016.7752620
 [6] BAO J, MA Z, DING Z, et al. On the Design of Multiuser Codebooks for Uplink SCMA Systems [J].IEEE Communications Letters, 2016, 20(10):1920-1923. DOI:10.1109/

LCOMM.2016.2596759

[7] 袁志锋, 郁光辉, 李卫敏. 面向5G的MUSA多用户共享接入[J]. 电信网技术, 2015, 40(5): 28-31
 [8] 康绍莉, 戴晓明, 任斌. 面向5G的PDMA图样分割多址接入技术[J]. 电信网技术, 2015, 40(5):43-47
 [9] DAI L, WANG B, YUAN Y, et al. Non-orthogonal Multiple Access for 5G: Solutions, Challenges, Opportunities, and Future Research Trends [J]. IEEE Communication Magazine, 2015, 53(9):74-81. DOI:10.1109/MCOM.2015.7263349
 [10] TAO Y, LIU L, LIU S, et al. A survey: Several Technologies of Non-orthogonal Transmission for 5G[J]. China Communications, 2015, 12(10):1-15. DOI: 10.1109/CC.2015.7315054
 [11] CHEN S, REN B, GAO Q, et al. Pattern Division Multiple Access (PDMA)-A Novel Non-orthogonal Multiple Access for 5G Radio Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(4): 3185 - 3196. DOI: 10.1109/TVT.2016.2596438
 [12] WANG B C, WANG K, LU Z, et al. Comparison Study of Non-orthogonal Multiple Access Schemes for 5G[C]//in Proc. IEEE BMSB, USA:IEEE, 2015:1-5. DOI: 10.1109/BMSB.2015.7177186

作者简介



肖可鑫, 上海交通大学博士研究生; 主要研究领域为无线通信的编码调制、多用户通信的非正交多址接入技术等。



夏斌, 上海交通大学电子工程系研究员; 主要研究方向为新型编码调制技术、协作通信、无线资源管理、新一代网络架构等; 已发表论文近60篇, 授权发明专利30余项, 近20项创新专利在多个国际通信标准中被接受。



陈智勇, 上海交通大学电子信息与电气工程学院副教授; 主要研究方向是物理层网络编码技术、无线协作传输、无线资源管理等; 已发表IEEE期刊论文20余篇, 会议论文30篇, 申请专利10项。