

基于大规模MIMO的低轨卫星通信系统

李科新^{1,2}, 尤力^{1,2}, 高西奇^{1,2}

(1.东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096 ;

2.紫金山实验室, 江苏 南京 211111)

摘要: 将大规模多输入多输出 (MIMO) 技术拓展应用于低地球轨道 (低轨) 卫星通信系统, 使得卫星具备实施灵活波束成形的能力, 这样能够充分利用大规模MIMO的空间自由度, 显著提高LEO卫星通信系统的频谱效率和功率效率。对基于大规模MIMO的LEO卫星通信系统中的若干相关问题进行研究, 分析大规模MIMO LEO卫星信道的特性, 并揭示其与地面无线信道的重要区别。针对大规模MIMO LEO卫星通信中的信道信息获取、多用户传输和用户调度等问题, 讨论当前工作面临的主要困难, 并探讨如何利用大规模MIMO LEO卫星信道特性针对性地设计具有较低实现复杂度的解决方案。

关键词: 低地球轨道卫星; 大规模多输入多输出; 卫星通信

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022001

Massive MIMO LEO Satellite Communications System

LI Kexin^{1,2}, YOU Li^{1,2}, GAO Xiqi^{1,2}

1.National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China

2.Purple Mountain Laboratory, Nanjing 211111, China

Abstract: Extending massive multiple-input multiple-output (MIMO) technique to low earth orbit (LEO) satellite communication systems enables satellites to implement flexible beamforming, which can make full use of the spatial degrees of freedom of massive MIMO and significantly improve the spectral efficiency and energy efficiency of LEO satellite communication systems. Several related issues in massive MIMO-based LEO satellite communication systems were studied. The characteristics of massive MIMO LEO satellite channels were analyzed. The important differences between them and terrestrial wireless channels were revealed. With the aim of addressing the problems on channel information acquisition, multi-user transmission and user scheduling in massive MIMO LEO satellite communication, the main difficulties faced by the current work were discussed, and how to use the characteristics of massive MIMO LEO satellite channels to design tailored solutions with low implement complexity was conceived.

Keywords: LEO satellite, massive MIMO, satellite communication

0 引言

可以预见的是, 未来无线通信将不再仅仅关注人与人之间的连接, 而是更加注重人与物、物与物之间的连接, 从而最终实现“万物互联”。然而, 现有的陆地无线网络仅能覆盖地球表面一半左右的区域, 在山区、沙

漠、海洋等偏远地区, 终端设备无法或仍需要以较高的成本接入互联网。在陆地无线网络不能或不足以提供互联网接入服务的区域, 卫星由于其更广的视野范围, 能够以较低成本为大量终端设备提供互联网接入服务, 已经受到人们广泛的关注^[1-4]。

收稿日期: 2022-01-05; **修回日期:** 2022-03-07

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2018YFB1801103); 江苏省前沿引领技术基础研究专项 (No.BK20192002); 国家自然科学基金项目 (No.61801114, No.61801113, No.61975234, No.61960206006, No.61971136)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB1801103), The Jiangsu Province Basic Research Project (No.BK20192002), The National Natural Science Foundation of China (No.61801114, No.61801113, No.61975234, No.61960206006, No.61971136)

过去卫星通信主要关注地球同步轨道 (Geosynchronous Earth Orbit, GEO) 卫星, 其轨道距离地面大约35 786 km。理论上, 3颗合理部署的GEO卫星即可覆盖全球。然而, GEO卫星通信不仅制造成本高昂, 而且更重要的是, 其具有较大的路径损耗和传输时延 (约为500 ms), 难以支持未来无线网络中的高速率、低时延场景。与GEO卫星相比, 距离地面2 000 km以内的低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星, 具有较小的路径损耗和传输时延 (约为30 ms)。自20世纪90年代起, LEO卫星就已被提出用于为全球用户提供个人通信服务。例如铱星计划 (Iridium)^[5], 然而这些商业计划最终都因资金和需求不足等原因被迫终止或缩小规模, 不能满足全球用户接入宽带互联网的需求。近年来, 随着可回收火箭、卫星制造、集成电路、无线通信等技术的成熟, 采用较低的发射成本部署大规模LEO卫星星座正在变得可行。从2018年开始, 美国Space X公司计划发射4万多颗星链 (Starlink) 卫星, 为全球用户提供宽带互联网接入服务^[6]。LEO卫星通信已经成为世界各国争相追逐的技术热点。

多波束卫星是卫星通信的一个重要研究方向。相比单波束卫星, 多波束卫星可以使用多个点波束来服务地面用户, 这提高了卫星通信的灵活性与适应性^[7-8]。卫星通常需要配备多波束天线来生成多个波束, 例如多馈源反射面天线、相控阵天线、数字有源天线等^[9]。为了减小波束间干扰, 多波束卫星通常采用多色复用方案, 即相邻的波束使用不同的频率或极化, 这样相距较远的波束可以使用相同的频率或极化, 从而提高系统容量。为了充分利用稀缺的频谱资源, 多波束卫星通信将逐渐采用全频率复用方案, 即所有的波束使用相同的频率和极化^[10-15], 然而, 这需要使用更加复杂的信号处理方法抑制波束间干扰。

在多波束卫星中, 波束需要通过波束成形网络 (Beamforming Network, BFN) 来生成。然而, 传统多波束卫星中的BFN通常是固定的, 或者以很慢的速度变化, 这将难以适应用户信道的动态变化^[10-15]。大规模多输入多输出 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 技术是5G中最重要的技术之一。基站 (Base Station, BS) 利用大量天线, 在同一时频资源上服务数十个用户, 从而极大地提高系统的频谱效率和功率效率^[16-17]。基站利用大规模MIMO生成大量波束, 每个波束对准一个用户, 其增益和方向可以根据用户信道状态进行灵活调整。随着无线通信技术的发展, 通过使用灵活的数字多波束天线, 在卫星侧实现可重构的动态BFN已经成为可能^[9]。因此, 考虑在LEO卫星侧配备大规模天线阵列, 构建大规模MIMO LEO卫星通信系统, 且卫星侧使用全数字BFN生成大量动态波束, 并根据用户的信道状态实时

调整波束增益和方向, 这可以极大地提高LEO卫星系统的通信能力。

大规模MIMO系统的性能增益依赖于发送端获取的信道信息质量^[18]。目前, 大多数研究假设发送端可以获得瞬时信道信息。然而, 在实际的卫星通信系统中, 由于存在较大的多普勒频移和传输时延, 发送端通常难以获得准确的瞬时信道信息。在时分双工 (Time Division Duplex, TDD) 系统中, 卫星首先估计上行的信道信息, 然后直接将其用于下行传输。当下行发送信号到达用户时, 所得到的上行信道信息估计值可能已经过时。在频分双工 (Frequency Division Duplex, FDD) 系统中, 用户首先估计下行信道信息, 然后将其反馈给卫星。所需反馈开销与卫星侧天线数呈正比, 这对大规模MIMO LEO卫星通信系统来说是难以接受的。此外, 由于较大的传输时延, 用户反馈的下行信道信息估计值, 当到达卫星侧时可能也会过时。相比于瞬时信道信息, 统计信道信息变化更加缓慢, 更加易于发送端及时准确地获取^[18]信息。因此, 一种更加合理的假设是, 发送端仅可以利用统计信道信息进行发送设计。

大规模MIMO在提高LEO卫星通信系统性能的同时, 面临着诸多挑战。一方面, 现有的卫星信道模型主要针对多波束卫星, 这种卫星信道模型并不适用于大规模MIMO LEO卫星通信。因此, 建立大规模MIMO LEO卫星信道模型显得尤为重要。另一方面, 由于LEO卫星通信载荷的限制, 大规模MIMO LEO卫星的信号处理模块应具有较低的实现复杂度。虽然在地面大规模MIMO无线通信中, 已有一些工作利用统计信道信息进行发送设计^[19-22], 但这些工作并未考虑大规模MIMO LEO卫星信道特性, 且实现复杂度较高。因此, 充分利用大规模MIMO LEO卫星信道的特点, 进而针对性地设计具有较低实现复杂度的收发设计方案, 对LEO卫星通信系统具有十分重要的意义。

本文所讨论的大规模MIMO LEO卫星通信系统主要工作在L/S/C等低频段, 并采用FDD工作模式。以下探讨大规模MIMO LEO卫星通信的若干研究内容, 包括信道模型、多用户传输、信道信息获取和用户调度, 并讨论当前面临的主要挑战以及可能的解决方案。

1 信道模型

建立大规模MIMO LEO卫星信道模型是设计传输方法、分析系统性能、估计信道参数等工作的前提。在大规模MIMO LEO卫星通信中, 卫星侧的大规模天线阵列将使得波束成形可以灵活配置, 并且波束具有较高的角度分辨率。目前, 尽管已有一些关于卫星信道模型的

研究,但这些研究主要考虑多波束卫星。在多波束卫星中,波束图案通常是固定的,其卫星并不具备灵活波束成形的能力。由此可知,已有工作中的卫星信道模型并不适用于大规模MIMO LEO卫星通信。因此,建立大规模MIMO LEO卫星信道模型是一项重要的工作。

为了方便描述大规模MIMO LEO卫星信道的特性,考虑在卫星侧配备大规模天线阵列,用户终端侧配备多根(或单根)天线。大规模MIMO LEO卫星信道模型也与通信系统的工作频段有关,应适用于不同的载波频段和场景。利用无线信道建模理论,大规模MIMO LEO卫星信道可以表示为一般多径信道的形式^[22-23]。为克服多径信道引发的频率选择性衰落,可以采用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术,将频率选择性衰落信道转化为多个并行的平坦衰落信道^[24]。

大规模MIMO LEO卫星模型具有如下特点。

(1) 由于卫星距离地面较远,LEO卫星信道的传输时延远高于陆地无线信道。例如,当卫星距离地面1 000 km且用户终端仰角为45°时,往返传输时延可达17.7 ms^[1]。

(2) 卫星和用户终端之间的相对运动会产生多普勒频移。由于卫星移动速率较快,LEO卫星信道的多普勒频移远高于陆地无线信道。例如,当卫星距离地面1 000 km且载波频率为4 GHz时,多普勒频移可达40 kHz^[25]。

(3) 由于卫星距离地面较远,在上(下)行传输过程中,在卫星侧观察到的同一用户终端的不同多径信号的到达(离开)角趋于相同。也就是说,LEO卫星通信中每一个用户终端的卫星侧角度扩展为零^[2]。

(4) 用户终端侧角度扩展取决于用户终端周围的信道散射环境。由于散射一般仅发生在用户终端周围几百米到几千米的范围内,LEO卫星通信中的用户终端侧角度扩展与陆地无线通信中的用户终端侧角度扩展相差不大。

(5) LEO卫星信道的莱斯因子取决于用户终端所处的信道环境。例如,当用户终端位于郊区、楼顶等没有遮挡的区域时,LEO卫星信道的莱斯因子一般较高(通常在10 dB以上);当用户终端位于山区、森林等有障碍物遮挡的区域时,LEO卫星信道的莱斯因子一般较低。

卫星与用户终端之间的多普勒频移由两部分构成,第一部分是由卫星移动引起的多普勒频移,第二部分是由用户移动引起的多普勒频移。在LEO卫星通信中,由卫星移动引起的多普勒频移可以通过卫星的轨道信息和用户终端的位置信息计算得到^[25]。参考文献[22-23]中利用卫星移动引起的多普勒频移和最小传播时延,考虑在用户终端侧进行多普勒频移和时延补偿,从而实现卫星和用户终端之间的频率和时间同步。

各个用户终端的卫星侧角度扩展为零,在卫星侧仅能观察到各个用户终端的一个到达角或离开角。当卫星侧天线阵列的位置和朝向确定时,各个用户终端在卫星侧的到达角或离开角仅由其位置唯一确定。由于卫星距离地面较远,各个用户终端的卫星侧到达角或离开角的变化相对比较缓慢,因此可以假设在传输过程中,收发端能够准确获取各个用户终端的卫星侧到达角或离开角。卫星的位置可以通过其轨道信息获得,各个用户终端的位置可以通过全球定位系统(Global Position System, GPS)获得。在卫星和用户终端的移动过程中,卫星可以根据位置信息对各用户终端进行跟踪。

在大规模MIMO LEO卫星通信中,卫星侧信道相关矩阵为秩一矩阵,这表明卫星侧不同天线上的信号具有高度的相关性。用户终端侧信道相关矩阵的秩受用户终端周围的传播环境影响。

2 信道信息获取

大规模MIMO LEO卫星信道信息获取在卫星通信系统中扮演着十分重要的角色。例如,在上行传输过程中,各用户终端同时给卫星发送信号,卫星需要利用多用户检测器对各个用户的发送信号进行接收处理。在实际系统中,多用户检测器的实现依赖于卫星侧获取的各个用户终端的信道信息。为了利用多用户检测器达到更高的频谱效率,卫星需要尽可能准确地估计各个用户终端的信道信息。因此,信道信息获取在大规模MIMO LEO卫星通信中具有较高的实际价值。

在无线通信中,信道信息获取通常有两种途径:基于盲估计的方法和基于导频符号的方法^[26]。在基于盲估计的方法中,接收端直接根据所收到的信号进行信道估计。这一方法通常需要较长的时间才能完成信道信息获取过程,并具有较高的实现复杂度,不适用于大规模MIMO LEO卫星通信。在基于导频符号的方法中,发送端周期性地发送接收端已知的导频符号。尽管基于导频符号的方法中会消耗一定的时间和频率资源进行信道训练,但其可以将信道估计过程和数据检测过程分离,从而大大降低实际系统中的实现复杂度。因此,在大规模MIMO LEO卫星通信中使用基于导频符号的方法进行信道信息获取是一种更加合理的方式。

大规模MIMO LEO卫星通信中信道信息获取仍面临特有的问题。一方面,大规模MIMO LEO卫星通信存在较大的多普勒频移和传输时延。当用户终端的移动速度较快,或者由卫星移动引起的多普勒频移存在估计误差时,LEO卫星信道会具有较高的时变特性。另一方面,由于LEO卫星信道具有较高的传输时延,所估计的信道

信息在用于数据传输时可能已经过时。如何在信道信息获取时,充分考虑LEO卫星信道的时变特性和传输时延,建立系统的信道信息获取方法,是一项具有重要意义的工作。

考虑到大规模MIMO LEO卫星信道的多径效应,信道信息获取时应该利用OFDM的子载波来发送导频符号,这可以被假设为大规模MIMO-OFDM信道估计问题^[27-28]。在上行信道信息获取过程中,多个用户终端同时向卫星发送导频信号;卫星根据接收到的信号估计各个用户终端在所有子载波上的信道信息。所需上行信道估计的导频开销与所有用户终端的天线总数呈正比^[29]。结果表明,利用统计信道信息可以提升信道信息获取的性能。在传统的线性最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)估计中,存在对大维矩阵的求逆操作,这难以在有限的卫星载荷上实现。此外,由于卫星覆盖区域内的用户终端较多,OFDM系统中可用正交相移导频的数量远小于用户数,用户终端应该最大程度地复用导频信号,从而减小导频开销。探究最优的正交相移导频分配方案,应结合大规模MIMO LEO卫星信道的特性,并考虑最终信道估计性能与实现复杂度之间的平衡。在下行信道估计过程中,卫星向用户终端发送导频信号,用户终端根据接收到的信号估计下行信道信息^[30]。由于卫星侧配备大规模天线阵列,采用传统方法进行下行信道估计的计算复杂度将变得难以承受。近年来,压缩感知等稀疏信号恢复方法被证实可以使用较小的导频开销达到较好的信道信息获取性能,正逐渐被研究者用于陆地大规模MIMO无线信道估计中^[28-30]。将压缩感知等稀疏信号恢复方法拓展应用于大规模MIMO LEO卫星通信中,针对上行和下行链路设计完整的低复杂度信道估计方法,同时逼近最优信道估计的性能,将是一个十分重要的研究方向。

3 多用户传输

利用大规模MIMO LEO卫星信道的特性,研究大规模MIMO LEO卫星通信多用户传输方案,对提高系统通信能力具有重要的实际意义。在下行多用户MIMO传输中,最优的发送设计可以通过脏纸编码(Dirty Paper Coding, DPC)实现^[31]。DPC是一种非线性的发送方案,难以在实际系统中实现,因此,大部分有关下行多用户MIMO的研究中仅考虑线性发送方案。目前发送端已知统计信道信息下行线性发送设计方案大致包括:联合空分复用^[19]、波分多址^[20]、基于后验信道模型的鲁棒传输^[21]等,但这些方案并未考虑大规模MIMO LEO卫星信道的特性。目前,已有的多用户传输方案要么仅考虑发送端已知瞬时信道信息,要么没有考虑大规模MIMO LEO

卫星信道的特性,且具有较高的实现复杂度,难以适用于大规模MIMO LEO卫星通信。因此,需要针对性地设计一种多用户传输方案,既可以充分利用大规模MIMO LEO卫星信道特性,又具有较低的实现复杂度。

利用卫星侧信道相关矩阵的秩一特性,参考文献[23]中证明在下行传输过程中,若要使遍历和速率最大化,各个用户终端的最优发送协方差矩阵应该为秩一矩阵。这一结论表明,在下行传输过程中,卫星给每个用户终端发送单个数据流,不会损失遍历和速率的性能。因此,在下行传输过程中,只需要考虑各个用户终端的预编码矢量设计。参考文献[22]的研究表明,相比传统四色复用方案,利用平均信漏噪比最大化准则设计的预编码矢量,可以显著提高大规模MIMO LEO卫星通信系统的频谱效率。

为了降低预编码实现的复杂度,参考文献[23]利用遍历和速率的紧致上界推导预编码矢量的结构。该结构表明,如果使遍历和速率上界最大化,最优预编码矢量仅取决于少量低维参数。参考文献[23]设计一种基于机器学习的低复杂度方法计算这些低维参数,然后根据得到的低维参数恢复出预编码矢量。相比ASLNR预编码,参考文献[23]的预编码设计方法进一步提升系统的频谱效率。参考文献[32]考虑一种在能效最大化准则下,卫星侧模数混合预编码矢量的设计方案,从而大大减少所需射频链路的数量,简化卫星通信载荷的硬件实现。此外,还有一些研究考虑非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)技术在大规模MIMO LEO卫星通信中的应用^[33]。

在上行传输过程中,各个用户终端同时向卫星发送信号。为了实现最优接收,卫星需要使用连续干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)对多个用户的发送信号进行接收处理^[34-36]。然而,如何仅利用统计信道信息设计各个用户终端的发送方案,从而逼近遍历和速率上界,实现大规模MIMO LEO卫星通信最优上行传输是值得探讨的问题。目前,文献中关于仅利用统计信道信息的多用户MIMO上行发送设计大多采用迭代注水的方式^[37-40],具有较高的实现复杂度,无法直接应用于大规模MIMO LEO卫星通信。因此,针对大规模MIMO LEO卫星上行传输,设计一种仅利用统计信道信息的低复杂度上行发送设计方案,是非常有前景的研究方向。

为了简化上行接收处理过程,参考文献[22]考虑一种线性的多用户检测器,并基于平均信干噪比最大化准则设计一种仅利用统计信道信息上行接收处理矢量,仿真结果表明其可以显著提升大规模MIMO LEO上行传输的频谱效率,并且具有渐进最优性。如何以更低的复杂度实现多用户检测器,从而逼近最优接收机的性能,是大规模

MIMO LEO卫星通信中一个非常具有实际意义的问题。

4 用户调度

在大规模MIMO LEO卫星通信中,在卫星的覆盖区域内通常存在大量用户终端等待通信。MIMO理论结果表明,大规模MIMO LEO卫星通信系统在同一时频资源所能支持通信的用户数不能超过卫星侧的天线数。针对大规模MIMO LEO卫星信道的特点,设计快速有效的用户分组方法,使得处于同一组的用户终端使用相同的时频资源,处于不用组的用户终端使用不同的时频资源,从而最大程度地减小用户间干扰。

用户调度可以被建模为一个整数规划问题,这类问题的可行集通常为离散变量的集合。理论上,整数规划问题的最优解可以通过遍历搜索获得。然而,在大规模MIMO LEO卫星通信系统中,用户终端的数量通常很大,即使对于较小数量的时频资源,对可行集进行遍历搜索的复杂度仍然难以接受。尽管传统的分支定界方法可以获得整数规划问题的最优解,但也具有较高的计算复杂度,难以在卫星侧快速实现。参考文献[22]设计一种仅利用空间角度的高效用户分组方法,仿真结果表明该方法可以较好地抑制多用户干扰,从而大幅提升系统频谱效率。

近年来,随着人工智能技术的发展,深度学习、强化学习、联邦学习等逐渐对无线通信产生不可忽视的影响。目前已经有一些研究将强化学习用于解决无线通信中的大维资源分配问题^[41]。相比于遍历搜索,基于强化学习的方法具有较低的计算复杂度,并且在很多场景下被证实可以逼近最优解的性能。通过充分挖掘大规模MIMO LEO卫星信道的特点,可探索利用强化学习方法求解大规模MIMO LEO卫星通信中用户调度问题的低复杂度方法。

5 结束语

大规模MIMO可以利用空间自由度显著提升LEO卫星通信系统的频谱效率和功率效率,是实现LEO卫星通信的关键技术之一。本文讨论大规模MIMO LEO卫星通信的主要研究内容,涉及信道模型、多用户传输、信道信息获取、用户调度等,并着重探讨一些已有的重要进展、当前工作的主要挑战以及可能的解决方案。在未来无线网络中,大规模MIMO LEO卫星可以与GEO卫星、无人机、陆地基站等相互协作,共同为用户终端提供全方位、立体式的网络覆盖,最终实现地面网络与非地面网络的深度融合。

参考文献:

- [1] GUIDOTTI A, VANELLI-CORALLI A, CONTI M, et al. Architectures and key technical challenges for 5G systems incorporating satellites[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(3): 2624-2639.
- [2] 3GPP TR 38.811. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15)[S]. 2020.
- [3] DI B Y, SONG L Y, LI Y H, et al. Ultra-dense LEO: integration of satellite access networks into 5G and beyond[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(2): 62-69.
- [4] SU Y T, LIU Y Q, ZHOU Y Q, et al. Broadband LEO satellite communications: architectures and key technologies[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(2): 55-61.
- [5] FOSSA C E, RAINES R A, GUNSCH G H, et al. An overview of the IRIDIUM (R) low Earth orbit (LEO) satellite system[C]// Proceedings of the IEEE 1998 National Aerospace and Electronics Conference. Piscataway: IEEE Press, 1998: 152-159.
- [6] DEL PORTILLO I, CAMERON B G, CRAWLEY E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. Acta Astronautica, 2019, 159: 123-135.
- [7] MARAL G, BOUSQUET M, SUN Z L. Satellite communications systems[M]. Chichester: Wiley, 2020.
- [8] LUTZ E, WERNER M, JAHN A. Satellite systems for personal and broadband communications[M]. Heidelberg: Springer, 2000.
- [9] HONG W, JIANG Z H, YU C, et al. Multibeam antenna technologies for 5G wireless communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 6231-6249.
- [10] VÁZQUEZ M Á, PÉREZ-NEIRA A, CHRISTOPOULOS D, et al. Precoding in multibeam satellite communications: present and future challenges[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(6): 88-95.
- [11] PEREZ-NEIRA A I, VAZQUEZ M A, SHANKAR M R B, et al. Signal processing for high-throughput satellites: challenges in new interference-limited scenarios[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2019, 36(4): 112-131.
- [12] ZHENG G, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. Generic optimization of linear precoding in multibeam satellite systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(6): 2308-2320.
- [13] CHRISTOPOULOS D, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. Multicast multigroup precoding and user scheduling for frame-based satellite communications[J]. IEEE Transactions on Wireless

- Communications, 2015, 14(9): 4695-4707.
- [14] WANG W J, LIU A, ZHANG Q, et al. Robust multigroup multicast transmission for frame-based multi-beam satellite systems[J]. IEEE Access, 2018, 6: 46074-46083.
- [15] SCHWARZ R T, DELAMOTTE T, STOREK K U, et al. MIMO applications for multibeam satellites[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2019, 65(4): 664-681.
- [16] MARZETTA T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590-3600.
- [17] NGO H Q, LARSSON E G, MARZETTA T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(4): 1436-1449.
- [18] GAO X Q, JIANG B, LI X, et al. Statistical eigenmode transmission over jointly correlated MIMO channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(8): 3735-3750.
- [19] ADHIKARY A, NAM J, AHN J Y, et al. Joint spatial division and multiplexing—the large-scale array regime[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 59(10): 6441-6463.
- [20] SUN C, GAO X Q, JIN S, et al. Beam division multiple access transmission for massive MIMO communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(6): 2170-2184.
- [21] LU A N, GAO X Q, ZHONG W, et al. Robust transmission for massive MIMO downlink with imperfect CSI[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(8): 5362-5376.
- [22] YOU L, LI K X, WANG J H, et al. Massive MIMO transmission for LEO satellite communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(8): 1851-1865.
- [23] LI K X, YOU L, WANG J H, et al. Downlink transmit design for massive MIMO LEO satellite communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(2): 1014-1028.
- [24] HWANG T, YANG C Y, WU G, et al. OFDM and its wireless applications: a survey[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(4): 1673-1694.
- [25] ALI I, AL-DHAHIR N, HERSHEY J E. Doppler characterization for LEO satellites[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(3): 309-313.
- [26] MA X L, YANG L Q, GIANNAKIS G B. Optimal training for MIMO frequency-selective fading channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(2): 453-466.
- [27] YOU L, GAO X Q, SWINDLEHURST A L, et al. Channel acquisition for massive MIMO-OFDM with adjustable phase shift pilots[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(6): 1461-1476.
- [28] LIU X F, WANG W J, SONG X H, et al. Sparse channel estimation via hierarchical hybrid message passing for massive MIMO-OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(11): 7118-7134.
- [29] YOU L, GAO X Q, XIA X G, et al. Pilot reuse for massive MIMO transmission over spatially correlated Rayleigh fading channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(6): 3352-3366.
- [30] LIU A, LIAN L X, LAU V K N, et al. Downlink channel estimation in multiuser massive MIMO with hidden Markovian sparsity[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(18): 4796-4810.
- [31] COSTA M. Writing on dirty paper (Corresp.)[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, 29(3): 439-441.
- [32] QIANG X Y, YOU L, LI K X, et al. Hybrid A/D precoding for downlink massive MIMO in LEO satellite communications[C]// Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [33] GAO Z X, LIU A J, HAN C, et al. Sum rate maximization of massive MIMO NOMA in LEO satellite communication system[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(8): 1667-1671.
- [34] CHRISTOPOULOS D, CHATZINOTAS S, MATTHAIU M, et al. Capacity analysis of multibeam joint decoding over composite satellite channels[C]//Proceedings of 2011 Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR). Piscataway: IEEE Press, 2011: 1795-1799.
- [35] YANG Y, GAO X Q, XIA X G. A closed-form capacity upper bound of multibeam GEO MSC uplink channel[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(6): 576-579.
- [36] COVER T M, THOMAS J A. Elements of Information Theory[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [37] SOYSAL A, ULUKUS S. Optimum power allocation for single-user MIMO and multi-user MIMO-MAC with partial CSI[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(7): 1402-1412.
- [38] SOYSAL A, ULUKUS S. Optimality of beamforming in fading MIMO multiple access channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(4): 1171-1183.
- [39] LI X, JIN S, GAO X Q, et al. Capacity bounds and low complexity transceiver design for double-scattering MIMO multiple access channels[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(5): 2809-2822.
- [40] LI X, JIN S, MCKAY M R, et al. Capacity of MIMO-MAC with transmit channel knowledge in the low SNR regime[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(3): 926-931.

- [41] YE H, LI G Y, JUANG B H F. Deep reinforcement learning based resource allocation for V2V communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4): 3163-3173.

[作者简介]



李科新（1995-），男，东南大学移动通信国家重点实验室博士生，主要研究方向为大规模MIMO无线通信和卫星移动通信。



尤力（1987-），男，东南大学移动通信国家重点实验室副研究员，主要研究方向为大规模MIMO无线通信和卫星移动通信。



高西奇（1967-），男，东南大学首席教授，移动通信国家重点实验室副主任，主要研究方向为大规模MIMO无线通信、卫星移动通信、光无线通信、移动通信信号处理等。