

毫米波大规模 MIMO 无线传输关键技术

Key Technologies in Millimeter Wave Massive MIMO Wireless Transmission

尤力/YOU Li
高西奇/GAO Xiqi

(东南大学, 江苏 南京 210096)
(Southeast University, Nanjing 210096, China)

随着现代信息社会的高速发展, 各种移动新业务需求持续增长, 无线传输速率需求将继续呈现指数增长趋势。预计于 2020 年商用的第 5 代移动通信系统(5G)的传输速率需求将是目前在营的第 4 代移动通信系统(4G)的 1 000 倍^[1]。在当前无线频谱资源日趋紧张的情形下, 如何进一步满足 5G 无线通信持续增长的速率需求, 成为未来移动通信技术面临的关键问题。

当前, 世界各国正广泛开展对 5G 关键技术的研究。5G 新技术将可能涉及物理层传输技术及载波频段等多个层面^[1]。在物理层传输层面, 基于大规模多输入多输出(MIMO)的无线传输技术能够深度利用空间维度的无线资源, 进而显著提升系统频谱效率和功率效率, 已经成为当前学术界和工业界的研究热点之一^[2]。而另一方面, 在载波频段的层面, 由于当前 6 GHz 以下蜂窝频段频谱资源的短缺, 利用毫米波频段实施无线通信

收稿日期: 2017-04-05

网络出版日期: 2017-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(61320106003、61471113、61521061、61631018); 国家高技术研究发展(“863”)计划(2015AA01A701、2014AA01A704); 国家科技重大专项(2014ZX03003006-003)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 03-0011-003

摘要: 认为毫米波大规模多输入多输出(MIMO)无线传输能够拓展利用新频谱资源, 深度挖掘空间维度无线资源, 大幅提升无线传输速率, 是未来无线通信系统最具潜力的研究方向之一。基于毫米波大规模 MIMO 无线传输基本架构, 论述了信道建模、信道信息获取、多用户无线传输及联合资源调配等毫米波大规模 MIMO 无线传输关键技术。

关键词: 大规模 MIMO; 毫米波通信; 信道信息; 波束赋形

Abstract: Millimeter wave massive multiple-input multiple-output (MIMO) wireless transmission is a promising technology for future wireless communications as it can expand the use of new spectrum resources, efficiently exploit the space domain wireless resources, and significantly improve the wireless data transmission rate. Based on the millimeter wave massive MIMO architecture, this paper presents a brief overview of the key techniques in millimeter wave massive MIMO wireless communications, including channel modeling, channel information acquisition, multiuser transmissions, and joint resource allocation.

Keywords: massive MIMO; millimeter wave communications; channel information; beamforming

也吸引了广泛的研究兴趣^[3-5]。

由于毫米波频段上相对较高的电波传播损耗, 毫米波无线传输技术的研究早年大多侧重于短距离通信场景^[6], 相关的技术无法直接应用于大范围覆盖的移动通信场景。考虑到毫米波频段上波长相对较短, 大规模天线阵列能够被同时装配到基站与用户侧。进而, 通过大规模天线阵列所提供的较高波束赋形增益能够补偿毫米波频段上相对较高的传播损耗。因此, 探索毫米波大规模 MIMO 无线传输技术在大覆盖移动通信场景中的应用, 正在成为研究者们关注的重要研究方向^[3-6]。

针对毫米波大规模 MIMO 无线传输, 文献中出现了一些初步的研究工作报告, 这些工作涉及信道建模、信

道信息获取及系统性能分析等多个方面^[7-19]。从已见报道的工作可见:

(1) 毫米波频段上宽带大规模 MIMO 信道的理论和实际建模的工作相对较少, 还没有出现受到广泛认可的毫米波大规模 MIMO 信道模型。

(2) 移动场景下毫米波信道存在严重的多普勒效应, 瞬时信道信息获取存在瓶颈问题; 文献中所报道的传输方法大多基于准确获取瞬时信道信息的理想假设, 存在实现复杂度较高等问题。

(3) 统计信道信息相对于瞬时信道信息变化较为缓慢, 利用统计信道信息可以辅助毫米波大规模 MIMO 无线传输设计, 提升系统传输性能。

(4) 毫米波大规模 MIMO 无线信道在波束域呈现能量集中等特性, 在

波束域实施毫米波大规模 MIMO 无线传输能够缓解毫米波信道的高路径损耗,同时深度利用空间无线资源,实现多用户共享空间无线资源。

由此可知,毫米波大规模 MIMO 无线传输技术研究尚处在起步阶段,存在着具有挑战性的基础理论和关键技术问题。为充分发掘其潜在的技术优势,需要探明典型移动场景下的毫米波大规模 MIMO 信道模型,并在实际信道模型、适度导频开销以及实现复杂度等约束条件下,分析其系统性能,进而探索最优传输技术,解决毫米波大规模 MIMO 无线传输所涉及的信息获取瓶颈问题、系统实现复杂度问题以及典型移动场景下的适用性问题等。

毫米波大规模 MIMO 无线传输能够拓展利用新频谱资源,并能深度挖掘空间维度无线资源,大幅提升无线传输速率,是支撑未来宽带移动通信最具潜力的研究方向之一。

1 信道建模

信道建模是通信系统设计的基础。在毫米波宽带大规模 MIMO 无线通信环境下,基站侧与用户侧均配置大规模天线阵列,信道的空间分辨率得到显著提升。此外,考虑毫米波在大气中的传播特性,毫米波信道在大尺度路径损耗、空间稀疏性、多径特性以及多普勒特性等方面与传统微波信道有着显著不同。研究和利用毫米波宽带大规模 MIMO 信道特性,具有重要的理论和实用价值。当前,尽管毫米波大规模 MIMO 无线传输已引起学术界和工业界的广泛关注,但相关的理论和实际建模的研究工作较少^[7-8],尚未有广泛认可的信道模型出现,这在一定程度上制约着毫米波宽带大规模 MIMO 无线传输技术工作的开展,相关的理论研究大多建立于准确已知瞬时信道信息的理想假设。为了突破这一局限,需要开展典型移动场景下毫米波宽带大规模 MIMO 信道的统计特性分析与建模。

值得指出的是:目前已有文献报道了一些初步的信道建模理论和实测结果,展示出在大规模 MIMO 系统中,随着天线数目的增加,不同用户的基站侧信道统计特征模式矩阵趋于一致,仅取决于基站侧天线阵列配置^[9-11]。利用这一特性,可以着重开展统计特征模式域(物理实现上可解释为波束域)信道特性的研究。一些近期的研究表明:毫米波大规模 MIMO 波束域信道元素在多径扩展以及多普勒扩展等方面呈现出新的特征^[12],进一步深入开展各种典型场景,特别是大覆盖移动场景中毫米波大规模 MIMO 波束域信道特性分析和建模研究具有重要的理论意义和实用价值。

2 信道信息获取技术

信道信息对于毫米波大规模 MIMO 无线传输性能起着重要影响作用。在毫米波大规模 MIMO 无线通信系统中,随着收发两侧天线数目和带宽的增加,信道参数数目显著增加。同时,毫米波频段信道的多普勒效应与传统频段信道相比更为明显。因此,信道信息获取在毫米波大规模 MIMO 无线通信系统中成为瓶颈问题。目前已有文献报道了毫米波大规模 MIMO 信道信息获取的研究工作^[13,14]。值得注意的是:利用毫米波频段波束域信道的近似稀疏以及多普勒扩展特性,可以有效降低信道信息获取所需的开销^[10]。进一步发展完善各种典型场景下波束域信道信息获取技术具有必要性。

统计信道信息可以用于优化导频设计,提升瞬时信道信息估计性能及系统传输性能。当前,尽管利用统计信道信息辅助毫米波大规模 MIMO 无线传输设计已经得到了一些研究者的关注,但是统计信道信息获取的相关研究工作较少。目前已有文献报道了大规模 MIMO 统计信道信息获取的初步研究结果^[15-16],然而这些方法大多并未针对毫米波大规模

MIMO 无线传输场景。利用毫米波宽带大规模 MIMO 波束域信道新特性,进一步开展相应的统计信道信息获取方法研究具有重要性。

3 多用户无线传输技术

如何优化设计多用户空分多址无线传输系统,涉及发送端和接收端所能获取的信道信息。在毫米波大规模 MIMO 无线传输系统中,随着收发两侧天线数目和带宽的增加,信道信息的获取成为瓶颈问题。与此同时,传统传输方案中通常采用的正则化迫零等方法涉及到复杂的大维矩阵求逆运算,实现复杂度较高^[17],这意味着毫米波大规模 MIMO 无线传输理论方法将不同于现有的 MIMO 传输理论方法。与瞬时信道信息相比,统计信道信息变化较为缓慢,获取开销较小。能否突破传统传输方案中信道信息获取的瓶颈问题,在发送端仅知统计信道信息的情形下,实现多用户共享空间无线资源和高性能低复杂度的毫米波大规模 MIMO 无线传输,是有待解决的重要问题。

目前已有文献报道了初步的研究工作,结果表明:在发送端仅知统计信道信息的情形下,通过适当的资源调配,在波束域实施毫米波大规模 MIMO 无线传输可以以较低的实现复杂度获取相对较高的性能^{[16][18]}。进一步发展完善毫米波大规模 MIMO 波束域多用户无线传输技术具有重要的实用价值。

此外,在完整的无线通信系统中,基站不仅要实现与各个用户之间的高速数据通信,还需要向小区中的所有用户发送控制信息,此时基站发送信号要具有全向特性,如何将具有全向特性的分集传输和空时编码传输理论方法拓展到毫米波大规模 MIMO 无线传输场景,实现高效的控制信息传输,值得深入研究^[19]。

4 多用户联合资源调配技术

为实现多用户空分多址传输,需

要高效的多用户资源调配理论方法,确定可以在同一时频资源上进行空分多址传输的空分用户组与与每个用户通信的空间资源。在毫米波大规模 MIMO 无线传输系统中,基站与各个用户进行通信的空间资源通常是基站侧统计特征模式所确定的波束资源,开展利用统计信道信息的资源调配理论方法研究具有理论意义和实用价值。目前文献中已有一些关于资源调配的研究工作报道,然而这些工作大多基于准确已知瞬时信道信息的理想假设,具有一定的局限性。发送端仅知统计信道信息的多用户联合资源调配技术的研究值得进一步深入开展。此外,多小区协作能够降低传输中断概率,进而解决毫米波信道所面临的传播遮挡等问题,开展多小区协作情形下的毫米波大规模 MIMO 分布式低协作开销联合资源调配技术研究具有实用性。值得注意的是:在毫米波大规模 MIMO 无线传输系统中,联合资源调配所涉及的问题规模通常较大,结合大数据机器学习等理论^[20-21]探索相应的低复杂度快速资源调配算法具有重要的实用价值。

5 结束语

毫米波大规模 MIMO 无线传输能够拓展利用新频谱资源和深度挖掘空间维度无线资源,大幅提升无线传输速率,是未来无线通信系统最具潜力的研究方向之一。相关理论方法尚处于起步阶段,存在着信道信息获取“瓶颈”和系统实现复杂性问题。基于毫米波大规模 MIMO 无线传输基本架构,文中我们讨论了信道建模、信道信息获取、多用户无线传输及联合资源调配等毫米波大规模 MIMO 传输关键技术的研究进展。

参考文献

- [1] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What will 5G be [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6):1065–1082. DOI: 10.1109/JSAC.2014.2328098
- [2] MARZETTA T L. Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11):3590–3600. DOI: 10.1109/TWC.2010.092810.091092
- [3] HEATH R W, GONZALEZ-PRELCIC N, RANGAN S, et al. An Overview of Signal Processing Techniques for Millimeter Wave MIMO Systems [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2016, 10(3):436–453. DOI: 10.1109/JSTSP.2016.2523924
- [4] ANDREWS J G, BAI T, KULKARNI M N, et al. Modeling and Analyzing Millimeter Wave Cellular Systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(1):403–430. DOI: 10.1109/TCOMM.2016.2618794
- [5] RANGAN S, RAPPAPORT T S, ERKIP E. Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges [J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(3):366–385. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2299397
- [6] SWINDLEHURST A L, AYANOGLU E, HEYDARI P, et al. Millimeter-Wave Massive MIMO: The Next Wireless Revolution [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(9):56–62. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6894453
- [7] RAPPAPORT T S, MACCARTNEY G R, SAMIMI M K, et al. Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models for Future Wireless Communication System Design [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(9):3029–3056. DOI: 10.1109/TCOMM.2015.2434384
- [8] HUR S, BAEK S, KIM B, et al. Proposal on Millimeter-Wave Channel Modeling for 5G Cellular System [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2016, 10(3):454–469. DOI: 10.1109/JSTSP.2016.2527364
- [9] 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. DOI: 10.1109/TIT.2013.2269476
- [10] 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. doi: 10.1109/TWC.2015.2404839
- [11] 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. DOI: 10.1109/TSP.2015.2502550
- [12] YOU L, GAO X Q, LI G Y, et al. BDMA for Millimeter-Wave/Terahertz Massive MIMO Transmission with Per-Beam Synchronization [EB/OL]. <https://www.semanticscholar.org/paper/BDMA-for-Millimeter-Wave-Terahertz-Massive-MIMO-You-Gao/86b94c8c1ffff5c38b5e17b036d9a4ef92ad04be>
- [13] ALKHATEEB A, EL AYACH O, LEUS G, et al. Channel Estimation and Hybrid Precoding for Millimeter Wave Cellular Systems [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5):831–846. DOI: 10.1109/JSTSP.2014.2334278
- [14] KOKSHOORN M, CHEN H, WANG P, et al. Millimeter Wave MIMO Channel Estimation Using Overlapped Beam Patterns and Rate Adaptation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(3):601–616. DOI: 10.1109/TSP.2016.2614488
- [15] MARZETTA T L, TUCCI G H, SIMON S H. A Random Matrix-Theoretic Approach to Handling Singular Covariance Estimates [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(9):6256–6271. DOI: 10.1109/TIT.2011.2162175
- [16] 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. DOI: 10.1109/TCOMM.2015.2425882
- [17] LU A A, GAO X Q, ZHENG Y R, et al. Low Complexity Polynomial Expansion Detector with Deterministic Equivalents of the Moments of Channel Gram Matrix for Massive MIMO Uplink [J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(2):586–600. DOI: 10.1109/TCOMM.2015.2506700
- [18] SUN C, GAO X Q, DING Z. BDMA in Multi-Cell Massive MIMO Communications: Power Allocation Algorithms [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(11):2962–2974. DOI: 10.1109/TSP.2017.2675862
- [19] MENG X, GAO X Q, XIA X G. Omnidirectional Precoding Based Transmission in Massive MIMO Systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(1):174–186. DOI: 10.1109/TCOMM.2015.2498159
- [20] CHIN W H, FAN Z, HAINES R. Emerging Technologies and Research Challenges for 5G Wireless Networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(2):106–112. DOI: 10.1109/MWC.2014.6812298
- [21] XIA X G. Small data, Mid data, and Big Data Versus Algebra, Analysis, and Topology [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2017, 34(1):48–51. DOI: 10.1109/MSP.2016.2607319

作者简介



尤力, 东南大学移动通信国家重点实验室讲师;研究方向为宽带大规模 MIMO 无线通信。



高西奇, 东南大学教授、博导, 移动通信国家重点实验室副主任;研究方向为移动通信理论与关键技术;已发表论文 200 余篇, 获授权发明专利近 50 项。