

大规模 MIMO 系统研究进展

戚晨皓 黄永明 金石

(东南大学信息科学与工程学院, 南京, 210096)

摘要: 随着无线通信技术的快速发展和智能手机的迅速普及, 人们对数据传输速率提出了更高的要求。为进一步提高数据传输速率, 通过增加基站天线数目构建大规模 MIMO 系统, 是一种高效而相对便捷的方式。大规模 MIMO 系统能深度发掘空间维的自由度, 使得基站能够利用同一时频资源服务于多个用户。本文探讨了大规模 MIMO 系统的导频污染问题及解决方案、适用于大规模 MIMO 系统的信道模型以及低复杂度的传输技术与实现方法三项关键技术。与现有 MIMO 系统相比, 大规模 MIMO 系统能显著提高频谱效率、能量效率和系统的鲁棒性能。作为第五代移动通信(5G)最具潜力的研究内容之一, 大规模 MIMO 无线通信技术已引起国内外的广泛关注, 但相关研究工作尚处在起步阶段, 还有大量的技术难点需要进一步突破。

关键词: 大规模 MIMO; 大规模天线阵列; 第五代移动通信; 频谱效率; 能量效率

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A

Overview of Massive MIMO System

Qi Chenhao, Huang Yongming, Jin Shi

(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

Abstract: With the rapid development of wireless communications and the popularization of smartphones, higher data rate of the service is required. The demand can be efficiently and conveniently satisfied by increasing the number of antennas at base station (BS), thus resulting in a massive MIMO system. The massive MIMO system can exploit the spatial degree of freedom, and therefore BS is enabled to simultaneously serve several user equipments (UE) with the same temporal and frequency resource. Three key techniques are presented in the massive MIMO system, including the pilot contamination issue and the corresponding solutions, the theoretical and practical channel model that fits for the massive MIMO system, and the low complexity transmission and implement methods. Compared with the existing MIMO system, the massive MIMO system can distinctively increase the spectral efficiency, the energy efficiency, and the system robustness. As one of the most promising topics on the fifth generation (5G) of wireless communication systems, the massive MIMO system has attracted the extensive attention worldwide. Nevertheless, the research of massive MIMO systems is still at its early stage, with a lot of technical problems to be solved.

Key words: massive MIMO; large-scale antenna array; 5G mobile communication; spectral efficiency; energy efficiency

引言

无线通信技术的快速发展和智能手机的迅速普及,带来了人们对无线数据传输需求的爆炸性增长。在国际电联 IMT-Advanced 4G 标准候选方案的征集中,明确要求上行和下行峰值数据速率达到 1 Gb/s;为此,3GPP 组织积极开展了 LTE-Advanced 技术研究,并在最近发布的 3GPP Release 11 版本中,支持 9 种传输模式,包括下行 8×8 和上行 4×4 的多输入多输出(Multi-input multi-output, MIMO)架构^[1]。因此,为进一步提高数据传输速率,通过增加基站天线数目构建大规模 MIMO 系统,是一种高效而相对便捷的方式^[2-4],未来 5G 及后续标准还将对大规模 MIMO 系统提供进一步的技术支持^[5-6]。

大规模 MIMO(Large-scale MIMO 或 Massive MIMO)系统最早由美国贝尔实验室的 Thomas L Marzetta 等研究人员提出^[7-8],研究发现,当小区的基站天线数目趋于无穷时,加性高斯白噪声和瑞利衰落等负面影响全都可以忽略不计,数据传输速率能得到极大提高。在大规模 MIMO 系统中,基站配置大量的天线^[9],天线数目通常有几十、几百甚至几千根,是现有 MIMO 系统天线数目的 1~2 个数量级以上,而基站所服务的用户设备(User equipment, UE)数目远少于基站天线数目;基站利用同一个时频资源同时服务若干个 UE,充分发掘系统的空间自由度。

在基站天线的配置方式上,可以把所有天线集中配置在一个基站上,形成集中式大规模 MIMO 系统,如图 1 所示。也可以把天线分布式地配置在多个节点上,通过光纤将这些节点连接起来再进行集中的数据处理,形成分布式大规模 MIMO 系统^[10],如图 2 所示。集中式大规模 MIMO 系统的优点在于,所有基站天线集中放置于一处,不需要像分布式大规模 MIMO 系统占用多处地理位置,并且可以有效避免光纤数据汇总时的同步问题。而分布式大规模 MIMO 系统的优点在于,它能有效形成多个独立的传输信道,避免集中式大规模 MIMO 系统天线配置过于紧密导致的信道相关性过强的问题;另外,分布式大规模 MIMO 系统可以获得更大的覆盖范围。具体在基站天线的布局上,还分为线阵天线布局、面阵天线布局和圆柱形天线布局等^[11]。尽管圆柱形天线布局最节省空间,但也需要结合基站架设的地理位置特点进行综合考虑,例如,在高楼的一侧边沿可以使用线阵天线布局,而在高楼的一面墙上可以使用面阵天线布局等。如图 1 所示,3 个小区的基站分别使用圆柱形天线布局、线阵天线布局和面阵天线布局,并使用窄波束与 UE 进行通信。

美国 Rice 大学的研究人员在其无线开放移动平台(Wireless open access research platform, WARP)平台上,搭建了一个 64 根天线的基站 Argos,它能同时服务 15 个 UE;相比于单天线系统,Argos 以 1/16 的功率实现了高达 6.7 倍的容量增益^[12]。

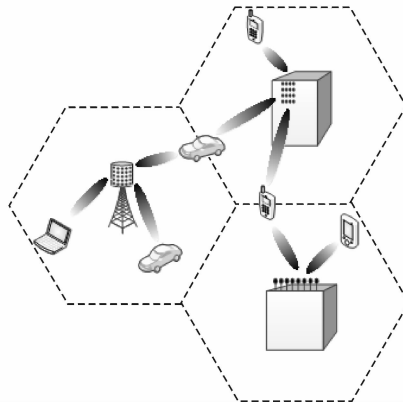


图 1 集中式大规模 MIMO 系统不同的基站天线布局

Fig. 1 Different Bs antenna configuration and deployment for antenna-collocated massive MIMO system

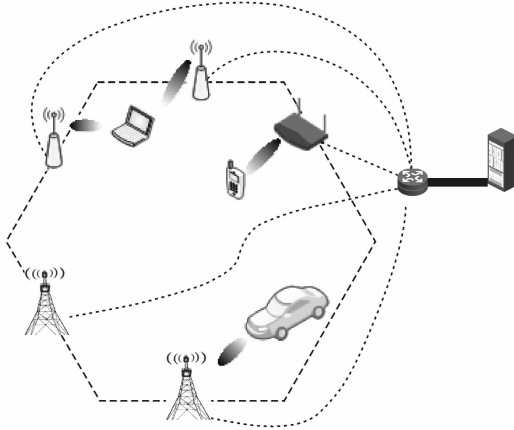


图 2 单小区分布式大规模 MIMO 系统

Fig. 2 Single-cell antenna-distributed massive MIMO system

1 大规模 MIMO 系统的优点

大规模 MIMO 系统的优点主要体现在以下几个方面:

(1) 大规模 MIMO 系统的空间分辨率与现有 MIMO 系统相比显著提高,它能深度挖掘空间维度资源,使得基站覆盖范围内的多个用户在同一时频资源上利用大规模 MIMO 提供的空间自由度与基站同时进行通信,提升频谱资源在多个用户之间的复用能力^[13],从而在不增加基站密度和带宽的条件下大幅度提高频谱效率(Spectral efficiency, SE)。

(2) 大规模 MIMO 系统可形成更窄的波束,集中辐射于更小的空间区域内,从而使基站与 UE 之间的射频传输链路上的能量效率更高,减少基站发射功率损耗。在多小区多用户大规模 MIMO 系统中,保证一定的服务质量(Quality of service, QoS)情况下,具有理想信道状态信息(Channel state information, CSI)时,UE 的发射功率与基站天线数目成反比,而当 CSI 不理想时,UE 的发射功率与基站天线数目的平方根成反比^[14]。因此,大规模 MIMO 系统能大幅提高能量效率(Energy efficiency, EE)^[15]。

(3) 大规模 MIMO 系统具有更好的鲁棒性能。由于天线数目远大于 UE 数目,系统具有很高的空间自由度,信道矩阵形成一个很大的零空间,很多干扰均可置于零空间内,使系统具有很强的抗干扰能力。当基站天线数目趋于无穷时,加性高斯白噪声和瑞利衰落等负面影响全都可以忽略不计。此外,更多的基站天线数目提供了更多的选择性和灵活性,系统具有更高的应对突发性问题的能力。

2 大规模 MIMO 系统的关键技术

在频分双工(Frequency-division duplexing, FDD)MIMO 系统中,UE 先进行下行信道估计,之后通过带宽有限的反馈链路,将估计出的信道的量化码本的索引反馈到基站侧,基站利用获得的 CSI,计算下行链路的波束成型矢量,通过波束成型提高了系统的传输性能和抗干扰能力。在 FDD 系统中,用于下行信道估计的导频开销与基站的天线数目成正比,同时,为了使 UE 能有效区分来自基站不同发射天线的不同信道并进行有效的信道估计,基站不同发送天线的导频必须相互正交,当基站天线数目很大时,FDD 系统将出现以下问题:

(1) 导频开销不够,系统无法利用有限的时频资源提供如此数目巨大的正交导频;

(2) UE 端待估计的信道数目急剧增加,并将成为 UE 沉重的负担并直接导致 UE 的电池电量不足;

(3) UE 将估计出的信道的量化码本的索引反馈到基站侧,反馈量过大,系统开销不够。

因此,最初研究的大规模 MIMO 系统通常不采用 FDD,而采用时分双工(Time-division duplexing, TDD)。TDD 能充分利用上行链路和下行链路的信道互易性,由上行信道估计获得下行波束成形所需的 CSI,这样,UE 发送的导频数目不随基站天线数目的增大而增加,而复杂的信道估计也只是在基站上完成,对 UE 不会产生不利影响。另一方面,考虑到中国国情,国家工业和信息化部正式将 LTE TDD 命名为 TD-LTE,定位为中国自主 3G 标准 TD-SCDMA 的后续演进,因此,研究 TDD 大规模 MIMO 系统的意义尤其重大。

2.1 导频污染问题及解决方案

大规模 MIMO 系统目前最大的性能瓶颈在于导频污染。当基站天线数目不多时,干扰、噪声、导频污染等都是影响系统性能的不利因素;而当基站天线数目急剧增长、甚至远大于当前服务的 UE 数目时,干扰、噪声等不利因素均可忽略不计^[16-18],导频污染问题就凸显出来,成为系统性能的瓶颈。由于导频的时间长度必须小于信道相干时间,而导频的频域宽度受限于 UE 上行带宽,若要为当前服务小区及所有相邻小区内的所有 UE 分配正交的导频,困难重重,尤其考虑到移动的 UE 时。因此,大规模 MIMO 系统优先考虑完全频率复用(复用因子为 1),所有小区都使用全部频率资源,以优先保证小区内所有 UE 导频正交。这样,不同小区的 UE 导频则无法保证正交,小区边缘 UE 向当前小区和相邻小区同时发送导频信号(如图 3 所示),产生导频污染。基站接收到污染的导频信号后,无法对该 UE 的上行信道进行准确估计,导致系统整体性能出现瓶颈。

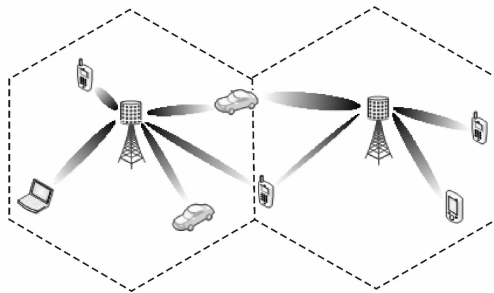


图 3 大规模 MIMO 系统中的导频污染

Fig. 3 Pilot contamination in massive MIMO system

为降低导频污染对系统性能造成的不利影响,目前可行的解决方案包括:

(1) 使用多小区协作进行基于最小均方误差(Minimum mean square error, MMSE)准则的波束成型,可同时降低小区内干扰和小区间干扰^[16]。

(2) 使用优化的导频分配或导频调度方案。例如,预先将多个小区分组^[19],某些分组的 UE 向基站发送导频时,其余分组的 UE 接收数据,避免所有小区的 UE 同时向基站发送导频,这种方法在无需多小区合作的情况下能有效减少导频污染所造成的小区间干扰^[20-21]。例如,利用信道的二阶统计信息进行多小区协作 Bayesian 信道估计,可自适应地为 UE 分配导频序列并充分协调导频的用量,减轻导频污染^[22]。

(3) 使用高效的信道估计方法^[23-25]。由于导频污染的根源在于使用导频辅助信道估计,因此,一种可行的方案是使用盲信道估计,不再使用导频从而避免导频污染^[26-29]。另外,考虑到无线信道自然的稀疏性,可利用压缩感知技术^[30-31],进行稀疏信道估计和导频设计^[32-42],降低导频开销,减轻导频污染。

2.2 适用于大规模 MIMO 系统的信道模型

在大规模 MIMO 系统中,基站配置有大量天线,MIMO 传输的空间分辨率显著提高,无线传输信道

存在着新的特性,需要深入系统地探讨适用于大规模 MIMO 系统的信道模型。在给定的信道模型和发射功率约束下,精确地表征该信道所能支持的最大传输速率,即信道容量,并由此揭示各种信道特性对信道容量的影响,可为传输系统的优化设计、频谱效率及能量效率等性能评估提供重要的依据。

现有工作往往假设大规模 MIMO 信道是独立同分布 (Independent and identically distributed, IID) 信道^[7,16,20,43]。然而部分实测结果表明,实际的大规模 MIMO 无线传输信道并不能满足 IID 假设,信道能量往往集中在有限的空间方向上^[11,44],这使得基于 IID 信道的相关分析结果存在着较大的局限性,一定程度上制约了大规模 MIMO 无线通信理论方法的深入研究工作。

大规模 MIMO 系统中基站配置有大量的天线,天线密度过高、挨得太近容易使传输信道呈现相关性,降低信道容量,例如,为保证信道不相关,天线之间的距离至少需要保持在四分之一波长以上,频段越高,波长越小,相同的空间可布局的天线数目更多;另一方面,现有频段的频谱资源十分紧缺,可以考虑使用毫米波频段甚至更高频段^[45-49],而不同的频段具有不同的无线传播特性,相应的信道模型也不尽相同。因此,在不同的频段、不同的天线及布局条件下,大规模 MIMO 无线信道的理论建模和实测建模工作亟需深入开展。

2.3 低复杂度的传输技术与实现方法

大规模 MIMO 系统中基站配置有大量的天线,相比于现有的 MIMO 系统,将产生海量的数据,从而对射频和基带处理算法提出更高的要求。在此情况下,处理方法越简单,则实现复杂度越低,而简单意味着使用线性或者近似线性的处理方法,尽可能避免使用非线性的方法。

大规模 MIMO 系统需要使用大量的射频单元,为了减轻功率放大器的负担,要求调制信号具有较低的峰均比 (Peak to average power ratio, PAPR),并使用恒包络或者近似恒包络的调制方式^[50-51]。同时,有必要充分考虑单载波方案在大规模 MIMO 系统各种传输场景下的可行性^[52],并与目前在 4G 中广泛采用的正交频分复用 (Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 方案进行对比,分析两者的优缺点及其适用性。

考虑到大规模 MIMO 系统中上行链路的信号检测和下行链路的波束成型涉及高维矩阵求逆运算,系统实现复杂度高,因此,需要思考现有 MIMO 系统的多用户无线传输理论与方法的适用性。研究适于大规模 MIMO 系统的资源分配、用户调度、信号检测、波束成型、分集传输、空时编码、多小区协作机制及其低复杂度实现方法。

另外, TDD 大规模 MIMO 系统充分利用了上行信道和下行信道的互易性,然而在实际硬件系统中,并不能达到完全互易。为了保证大规模 MIMO 系统的高波束分辨率与高信道增益,需要高精度的信道校准方法使基站侧收发通道达到很好的一致性,保证波束成型的准确性^[53]。基站天线阵列在波束成型或导向矢量作用下,在空间维度合成很窄的波束,精确指向待接收的 UE,可以增强其接收性能,提高接收信号功率,减少 UE 之间和小区间的干扰。因此,研究高精度和低复杂度的信道校准方法、探讨基站进行信道校准的频度以及如何降低信道校准所需的系统开销等问题,是提高大规模 MIMO 系统性能的关键。

3 结束语

本文介绍了大规模 MIMO 系统,分析了其优点及关键技术难点,讨论了大规模 MIMO 系统导致频污染问题及解决方案、适用于大规模 MIMO 系统的信道模型和低复杂度的传输技术与实现方法。大规模 MIMO 系统能大幅度提升频谱利用率、能量利用率和系统的鲁棒性,目前已成为 5G 无线通信领域最具潜力的研究方向之一。尽管如此,仍有大量的研究工作有待开展,在大规模 MIMO 系统硬件实现、低复杂度的信号处理算法、干扰管理与抑制等方面亟需深入研究。

参考文献:

- [1] Ghosh A, Ratasuk R, Mondal B, et al. LTE-advanced: Next-generation wireless broadband technology[J]. *IEEE Wireless Commun*, 2010, 17(3): 10-22.
- [2] Larsson E G, Tufvesson F, Edfors O, et al. Massive MIMO for next generation wireless systems[J]. *IEEE Commun Mag*, 2014, 52(2): 186-195.
- [3] Lu L, Li G, Swindlehurst A L, et al. An overview of massive MIMO: Benefits and challenges[J]. *IEEE J Sel Topics in Signal Process*, 2014, 8(5): 742-758.
- [4] 尤力,高西奇. 大规模 MIMO 无线通信关键技术[J]. *中兴通讯技术*, 2014, 20(2): 26-28.
You Li, Gao Xiqi. Key technologies in massive MIMO wireless communication[J]. *ZTE Technology Journal*, 2014, 20(2): 26-28.
- [5] 尤肖虎,潘志文,高西奇,等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. *中国科学:信息科学*, 2014, 44(5): 551-563.
You Xiaohu, Pan Zhiwen, Gao Xiqi, et al. The 5G mobile communication: The development trends and its emerging key techniques[J]. *Science China Information Sciences*, 2014, 44(5): 551-563.
- [6] Boccardi F, Heath R W, Lozano A, et al. Five disruptive technology directions for 5G[J]. *IEEE Commun Mag*, 2014, 52(2): 74-80.
- [7] Marzetta T. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2010, 9(11): 3590-3600.
- [8] Rusek F, Persson D, Lau B K, et al. Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays[J]. *IEEE Sig Proc Mag*, 2012, 30(1): 40-60.
- [9] Hoydis J, Brink S, Debbah M. Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: How many antennas do we need? [J]. *IEEE J Select Area Commun*, 2013, 31(2): 160-171.
- [10] Zhang J, Wen C-K, Shi J X, et al. On capacity of large-scale MIMO multiple access channels with distributed sets of correlated antennas[J]. *IEEE J Select Area Commun*, 2013, 31(2): 133-148.
- [11] Gao X, Tufvesson F, Edfors O, et al. Measured propagation characteristics for very-large MIMO at 2.6 GHz[C]//*Asilomar Conf on Signals, Syst and Computers*. Pacific Grove, CA, 2012: 295-299.
- [12] Shepard C, Yu H, Anand N, et al. Argos: practical many-antenna base stations[C]//*Proc ACM Int Conf Mobile Computing and Networking*. Istanbul, Turkey: [s. n.], 2012: 53-64.
- [13] Huh H, Caire G, Papadopoulos H, et al. Achieving massive MIMO spectral efficiency with a non-so-Large number of antennas[J]. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2012, 11(9): 3226-3239.
- [14] Ngo H Q, Larsson E G, Marzetta T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems[J]. *IEEE Trans Commun*, 2013, 61(4): 1436-1449.
- [15] Bjornson E, Hoydis J, Kountouris M, et al. Massive MIMO systems with non-ideal hardware: Energy efficiency, estimation, and capacity limits[J]. *IEEE Trans Inf Theory*, 2014, 60(11): 7112-7139.
- [16] Jose J, Ashikhmin A, Marzetta T, et al. Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems[J]. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2011, 10(8): 2640-2651.
- [17] Ngo H Q, Marzetta T L, Larsson E G. Analysis of the pilot contamination effect in very large multicell multiuser MIMO systems for physical channel models[C]//*Proc IEEE 36th International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*. Prague, Czech; IEEE, 2011: 3464-3467.
- [18] Gopalakrishnan B, Jindal N. An analysis of pilot contamination on multi-user MIMO cellular systems with many antennas [C]//*IEEE 12th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. California, United States; IEEE, 2011: 381-385.
- [19] Xu Y, Yue G, Mao S. User grouping for massive MIMO in FDD systems: New design methods and analysis[J]. *IEEE Access*, 2014, 2: 947-959.
- [20] Fernandes F, Ashikhmin A, Marzetta T L. Inter-cell interference in noncooperative TDD large scale antenna systems[J]. *IEEE J Select Area Commun*, 2013, 31(2): 192-201.

- [21] Appaiah K, Ashikhmin A, Marzetta T L. Pilot contamination reduction in multi-user TDD systems[C]//Proc International Conference on Communications (ICC). Cape Town, South Africa: [s. n.], 2010:1-5.
- [22] Yin H, Gesbert D, Filippou M, et al. A coordinated approach to channel estimation in large-scale multiple-antenna systems [J]. *IEEE J Select Area Commun*, 2013,31(2):264-273.
- [23] Noh S, Zoltowski M D, Sung Y, et al. Pilot beam pattern design for channel estimation in massive MIMO systems[J]. *IEEE J Sel Topics Signal Process*, 2014,8(5):787-801.
- [24] Choi J, Love D J, Bidigare P. Downlink training techniques for FDD massive MIMO systems: Open-loop and closed-loop training with memory[J]. *IEEE J Sel Topics Signal Process*, 2014,8(5):802-814.
- [25] Dai L, Wang Z, Yang Z. Spectrally efficient time-frequency training OFDM for mobile large-scale MIMO systems[J]. *IEEE J Select Area Commun*, 2013,31(2):251-263.
- [26] Ngo H Q, Larsson E G. EVD-based channel estimations for multicell multiuser MIMO with very large antenna arrays[C]//IEEE Int Conf on Acoust, Speed and Signal Process (ICASSP). [S. l.]: IEEE, 2012: 3249-3252.
- [27] Muller R R, Vehkaperä M, Cottatellucci L. Blind pilot decontamination[C]//Proc Int ITG Workshop on Smart Antennas (WSA). Stuttgart:[s. n.], 2013:1-6.
- [28] Muller R R, Cottatellucci L, Vehkaperä M. Blind pilot decontamination[J]. *IEEE J Sel Topics in Signal Process*, 2014,8(5):773-786.
- [29] Cottatellucci L, Müller R R, Vehkaperä M. Analysis of pilot decontamination based on power control[C]//Proc IEEE Veh Technol Conf (VTC). Dresden; IEEE, 2013:1-5.
- [30] Donoho D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Trans Inf Theory*, 2006,52(4):1289-1306.
- [31] Baraniuk R G. Compressive sensing[J]. *IEEE Signal Process Mag*, 2007,24(4):118-121.
- [32] Qi C, Wu L. Uplink channel estimation for massive MIMO systems exploring joint channel sparsity[J]. *Electr Lett*, 2014, 50(23):1770-1772.
- [33] Qi C. Interview: By exploring the joint sparsity of the uplink channel, the pilot overhead can be substantially reduced[J]. *Electr Lett*, 2014,50(23):1650.
- [34] Qi C, Wu L. Tree-based backward pilot generation for sparse channel estimation[J]. *Electr Lett*, 2012,48(9):501-503.
- [35] Qi C, Wang X, Wu L. Underwater acoustic channel estimation based on sparse recovery algorithm[J]. *IET Signal Process*, 2011,5(8):739-747.
- [36] Chenhao Qi, Guosen Yue, Lenan Wu, et al. Pilot design schemes for sparse channel estimation in OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015,64(4):1493-1505.
- [37] Qi C, Yue G, Wu L, et al. Pilot design for sparse channel estimation in OFDM-based cognitive radio systems[J]. *IEEE Trans Veh Technol*, 2014,63(2):982-987.
- [38] Qi C, Wu L. Optimized pilot placement for sparse channel estimation in OFDM systems[J]. *IEEE Signal Process Lett*, 2011,18(12):749-752.
- [39] Qi C, Wu L. A study of deterministic pilot allocation for sparse channel estimation in OFDM systems[J]. *IEEE Commun Lett*, 2012,16(5):742-744.
- [40] Qi C, Wu L. A hybrid compressed sensing algorithm for sparse channel estimation in MIMO OFDM systems[C]//IEEE 36th International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2011). Prague; IEEE, 2011:3488-3491.
- [41] Qi C, Wu L. Application of compressed sensing to DRM channel estimation[C]//IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC-Spring 2011). Budapest; IEEE, 2011:1-5.
- [42] Nguyen S, Ghayeb A. Compressive sensing-based channel estimation for massive multiuser MIMO systems[C]//Proc IEEE Wireless Commun and Netw Conf (WCNC). Shanghai, China; IEEE, 2013:2890-2895.
- [43] Alrabadi O N, Tsakalaki E, Huang H, et al. Beamforming via large and dense antenna arrays above a clutter[J]. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2013,31(2):314-325.
- [44] Wu S, Wang C-X, Aggoune E, et al. A non-stationary 3-D wideband twin-cluster model for 5G massive MIMO channels[J]. *IEEE J Select Area Commun*, 2014,32(6):1207-1218.
- [45] Rappaport T, Sun S, Mayzus R, et al. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular; It will work! [J]. *IEEE*

Access, 2013,1;335-349.

- [46] Swindlehurst A L, Ayanoglu E, Heydari P, et al. Millimeter-wave massive MIMO: The next wireless revolution? [J]. IEEE Commun Mag, 2014;52(9):56-62.
- [47] Roh W, Seol Ji-Yun, Park J, et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results[J]. IEEE Commun Mag, 2014,52(2):106-113.
- [48] El Ayach O, Rajagopal S, Abu-Surra S, et al. Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2014,13(3):1499-1513.
- [49] Pi Z, Khan F. An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems[J]. IEEE Commun Mag, 2011,49(6):101-107.
- [50] Studer C, Larsson E G. PAR-aware large-scale multi-user MIMO-OFDM downlink[J]. IEEE J Select Area Commun, 2013, 31(2):303-313.
- [51] Mohammed S K, Larsson E G. Per-antenna constant envelope precoding for large multi-user MIMO systems[J]. IEEE Trans Commun, 2013,61(3):1059-1071.
- [52] Pitarokoilis A, Mohammed S K, Larsson E G. On the optimality of single-carrier transmission in large-scale antenna systems [J]. IEEE Wireless Commun Lett, 2012,1(4):276-279.
- [53] Rogalin R, Bursalioglu O Y, Papadopoulos H, et al. Scalable synchronization and reciprocity calibration for distributed multiuser MIMO[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2014,13(4):1815-1831.

作者简介:



戚晨皓(1981-),男,副教授,研究方向:5G 无线通信与稀疏信号处理,E-mail: qch@seu.edu.cn



黄永明(1977-),男,教授,研究方向:MIMO 无线通信及信号处理。



金石(1974-),男,教授,研究方向:5G/4G 移动通信理论与关键技术。