

# 大规模 MIMO 下行预编码技术

## Precoding Technique for Massive MIMO Downlink

陆晨/LU Chen

王闻今/WANG Wenjin

高西奇/GAO Xiqi

(东南大学, 江苏 南京 210096)

(Southeast University, Nanjing 210096, China)

**多**输入多输出(MIMO)技术因具有大幅提高系统容量的能力而获得广泛研究和应用,例如高速下行分组接入(HSDPA+),全球微波接入互操作性(WiMAX)和长期演进(LTE)。为了满足持续增长的移动终端数量和移动数据业务需求,下一代移动通信系统(5G)在数据传输速率、频谱效率、能耗、延时等性能方面要比LTE系统提高一个数量级甚至更多。大规模MIMO技术<sup>[1-2]</sup>凭借进一步提升的频谱效率和能量效率优势成为无线通信领域的又一个研究热点,成为5G移动通信系统的关键技术之一。

在大规模MIMO系统中,基站(BS)可配置100根甚至更多的天线,天线数量远大于当前LTE系统中使用的4/8根天线,配备巨大数量天线的基站同时服务多个移动台(MS)。在文献[1]中,Marzetta考虑了无限制天线数目基站的非合作多用户大规模MIMO系统,基于传播信道的独立

收稿时间: 2016-02-20

网络出版时间: 2016-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(61320106003、61471113、61401095); 国家高技术研究发展(“863”)计划(2015AA01A701)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 03-0017-005

**摘要:** 考虑大规模多输入多输出(MIMO)中导频序列开销过大以及预编码复杂度的问题,提出了两种适用于大规模MIMO的预编码技术:基于用户调度和波束选择的波束分多址(BDMA)下行传输技术,即通过简单高效的贪婪算法进行用户调度和波束分配,使不同的用户在正交的波束上进行传输;基于用户分组的两级预编码技术,即基于用户分组的两级预编码方法,利用聚类算法将信道特性相似的用户分为一组,基站进行第一级组间干扰消除预编码,基站获取分组的等效瞬时信道后,进行第二级组内干扰消除预编码。研究结果证明:两种下行传输技术在解决大规模MIMO中导频开销过大和系统复杂度问题方面都是切实有效的。

**关键词:** 大规模MIMO系统;用户调度;波束分多址;两级预编码

**Abstract:** Considering the problem of costly pilot training and computation complexity in massive multiple input multiple output (MIMO) systems, two precoding techniques adapted to massive MIMO are proposed: beam division multiple access (BDMA) downlink transmission based on user scheduling and beam allocation, which can realize the orthogonal transmission of different users on non-overlapping beams by a simple and effective greedy algorithm; two-stage precoding technique based on user grouping, which partitions the users into multiple groups each with approximately channel covariance matrix by a clustering algorithm, the first-stage precoding aims to suppress inter-group interference, the second-stage precoding is conducted to mitigate intra-group interference after the base stations obtain the instantaneous effective channel of different groups. Research results demonstrate that both downlink techniques are practical in solving the costly pilot and complexity problem of massive MIMO.

**Keywords:** massive MIMO system; user scheduling; beam division multiple access; two-stage beamforming

同分布的假设,不同用户的传播信道在天线数目趋向于无穷时渐进正交,在此类场景中,简单的匹配滤波器(MF)接收机或者波束成形(BF)预编码是最优的。与此同时,噪声和小区内干扰的影响也渐进消失。利用时分双工(TDD)系统上下行信道互易特性,基站可以通过上行信道导频训练得到下行信道状态信息(CSI)。然而,由于多个小区之间导频序列的重用,导致多小区之间的干扰不会随着

天线数目的增加而消失<sup>[3-4]</sup>,产生所谓的导频污染问题。在实际通信系统中,传输信道独立性假设并不成立,实际基站天线数目也并不可能无穷大,因此MF接收机/BF预编码性能也远低于理论值,无法直接应用于实际系统中。此外,CSI的获取问题也使得大规模MIMO的实现变得极具挑战性。TDD系统可以利用信道互易性通过上行链路导频训练得到估计的下行信道信息,训练开销与所有用户

的天线数之和成正比,但是当用户数目非常巨大或者每个用户配备多天线的時候,训练开销将随之变得非常巨大。除此以外,随着用户移动速度的增加,信道相关时间变得相对很短,因而获得准确的瞬时发送端信道状态信息(CSIT)将变得更加困难。在频分双工(FDD)系统中,由于没有信道互易特性,下行链路训练开销以及反馈数据比特与基站端天线数目成正比<sup>[9]</sup>,因此纯粹的下行训练、上行反馈获得 CSIT 的方法在大规模 MIMO 中不可实现。正是由于这个原因,目前很多关于大规模 MIMO 的研究都是针对 TDD 系统。尽管如此, TDD 系统的很多不足<sup>[9]</sup>也限制了其性能增益。

为了解决多用户大规模 MIMO 系统面临的导频开销问题、实现复杂度问题以及 FDD 系统中高速移动场景下面临的上下行信道互易性问题,波束分多址(BDMA)传输方案<sup>[7]</sup>被提出。利用大规模天线阵列的空间局部性特点,即大规模 MIMO 信道在波束域的稀疏性,寻找互不干扰的多个波束用户对,不同空间方向的用户在不同的波束集合与基站进行通信,以实施较高维度的空分多址传输。文献[7]已经从理论上证明:当不同用户的传输波束完全正交时,波束域传输是最优的。

此外,美国南加州大学提出了联合空分复用(JSDM)传输方案以适用于 FDD 大规模 MIMO 系统。JSDM 下行链路中使用一种基于用户分组的二级预编码技术<sup>[8-10]</sup>,并获得了进一步的研究<sup>[11-12]</sup>:第一级预编码利用统计 CSI 进行用户分组,将信道空间特性相似的用户分成一组,从而将多用户大规模 MIMO 传输转换为多个小规模 MIMO 的传输问题;第二级预编码消除组内用户间的干扰,从而提高系统可达遍历和速率。

## 1 传统预编码方法

传统下行预编码方法是以基站

获得完整瞬时 CSIT 为前提。对于小规模天线阵列,一种典型的系统设计是基站天线单元向移动端发送训练序列,移动端进行信道估计,并将 CSI 通过反馈信道反馈给基站。这样的信道估计方案没有依赖信道的互易特性。然而随着基站天线数目的增加,所需要的训练序列长度和基站天线数成正比,不仅导致频谱效率下降,而且发送导频所需的时间会超过信道相关时间,无法支持移动性的相关要求。

为了能够在信道相关时间内完成训练序列的发送,需要利用信道的互易特性。用户端向基站发送导频,基站对上行信道进行估计,根据信道互易性利用上行信道信息进行下行预编码,此时训练序列长度只是与所有用户天线数目之和成正比,在用户数目适当的情况下,导频开销可以被接受。由于信道互易性在一般情况下只存在于 TDD 系统中,所以本部分我们讨论的预编码方法仅适用于 TDD 系统。

配置  $M$  根天线的基站同时服务  $K$  个单天线用户,基站端发射总功率  $\rho$ ,在基站天线和用户数目趋于正无穷( $M, K \rightarrow \infty$ ),但是比值固定( $\alpha = M/K$ )的大规模天线系统限制条件下,给出传统预编码方法的信噪比(SNR)/信干噪比(SINR)渐进表达式,具体结果见表 1。

我们首先讨论无干扰(IF)系统的性能,作为其他方法的性能参考基准。如果存在一种编码方式,使得基

▼表 1 基本预编码技术在大规模 MIMO 下 SNR/SINR 表达式

预编码	完美 CSI	非完美 CSI
IF 系统	$\rho\alpha$	
ZF 预编码	$\rho(\alpha-1)$	$\frac{\xi^2 \rho(\alpha-1)}{(1-\xi^2)\rho+1}$
MF 预编码	$\frac{\rho\alpha}{\rho+1}$	$\frac{\xi^2 \rho\alpha}{\rho+1}$

注:  $M, K \rightarrow \infty, M/K = \alpha$   
 CSI: 下行信道状态信息  
 IF: 无干扰系统  
 MF: 匹配滤波  
 SINR: 信干噪比  
 SNR: 信噪比  
 ZF: 迫零

站到指定用户的所有信道能量都用来给该用户进行数据传输,而没有任何其他用户造成的干扰,那么这种预编码方式将可以达到最好的性能表现。可以证明,每个接收单元的 SNR 收敛于  $\rho\alpha$ 。

在各类预编码方法中,最简单且直观的预编码就是求信道矩阵的伪逆,这也被称为迫零(ZF)预编码<sup>[13]</sup>。ZF 预编码的一种变化方法被称为块对角化(BD)预编码<sup>[14]</sup>,适用于用户配备多天线的情况。每个用户端接收 SNR,表达形式见表 1。ZF 预编码存在的一个问题就是需要对  $K \times K$  维矩阵进行求逆,这是一个非常耗时的操作。ZF 预编码存在的另一个问题就是噪声放大,当信道矩阵病态时,接收端信噪比会急剧降低,从而性能受到很大的影响。因此基于 ZF 预编码的一种改进预编码方法,被称为正则化迫零(RZF)预编码。

当天线数目趋于无穷时,结果 ZF 预编码矩阵趋近信道矩阵的转置形式,这正是 MF 预编码。根据大维随机矩阵理论可以推导出 MF 预编码渐进 SINR 表达式,如表 1 中所示。同样,从表 1 中还可以看到, MF 和 ZF 预编码在非完美信道下的 SNR/SINR 表达式。

由表 1 的理论公式可知:ZF 预编码在基站天线数目远远大于用户数目时(即  $\alpha \gg 1$ ),性能接近于 IF 系统的性能上界;但是当基站天线数目和用户数目相近(即  $\alpha \approx 1$ )时,性能急剧下降,甚至会趋于 0。MF 预编码在基站发送能量很小时,接近 IF 系统性能,但是由于 MF 预编码没有进行任何干扰消除,所以在高信噪比下,干扰为系统性能的主要影响因素, SNR 趋于一个常数,远差于 ZF 预编码性能。

图 1—3 为 ZF、RZF 和 MF 预编码的遍历和速率仿真结果,同时也给出了 IF 系统的性能上界基准。在仿真中,有 10 个用户被同时服务,分别对应了基站天线数目为 10、30、100 的

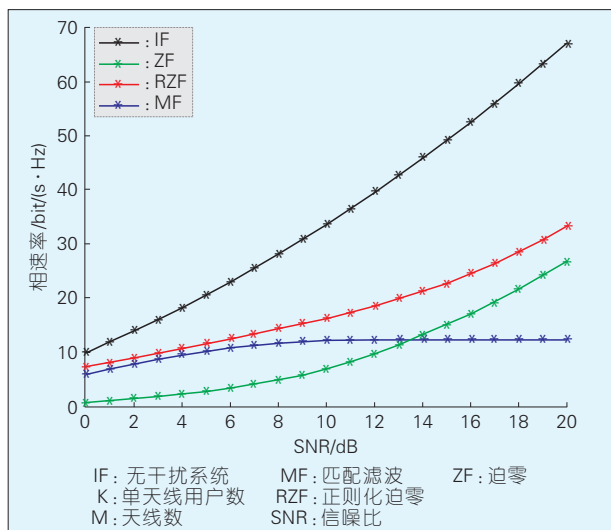


图1  
当  $M=10, K=10$  时各种预编码和速率性能对比

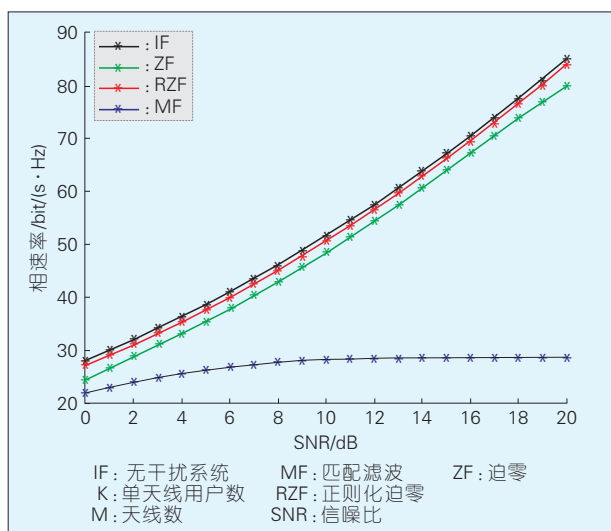


图2  
当  $M=30, K=10$  时各种预编码和速率性能对比

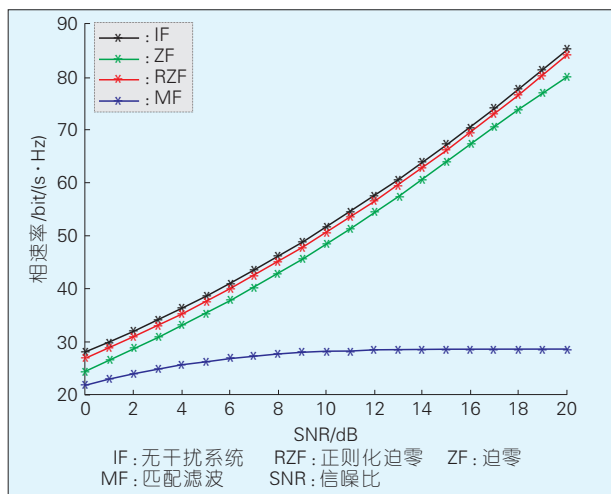


图3  
当  $M=100, K=10$  时各种预编码和速率性能对比

情景。从仿真结果可知:对于天线数目为 10 的情况,此时 ZF 性能远差于

IF 系统基准性能,甚至在中低信噪比时比 MF 预编码性能还要差,但是在

高信噪比时,由于噪声影响较小,用户间干扰占主导作用,因而 MF 预编码性能较差。随着天线数目的增加, ZF 性能也不断接近 IF 基准性能。由于 RZF 考虑了噪声放大问题,所以在所有信噪比范围内,其性能都要比 ZF 和 MF 要好。MF 预编码虽然随着天线数目的增加,性能会有所提升,但是由于没有进行任何干扰消除的操作,因而在高信噪比时的性能较差,这正和理论分析一系列的结果相符合。

## 2 大规模 MIMO 下行预编码

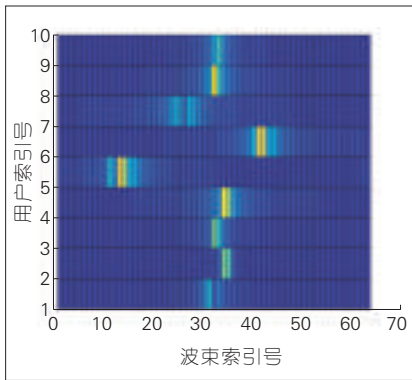
上述预编码技术都必须在基站能够获得完整 CSIT 的基础上才能够应用,并仅适用于 TDD 系统,随着用户数目的增加,同样会面临导频开销过大的问题。为了应对大规模 MIMO 系统中的各种困难,针对大规模 FDD 系统的 BDMA 传输方案被提出。在 BDMA 下行传输过程中,利用一种贪婪算法进行用户调度,使得不同用户在不同波束上进行数据传输。此外,文献[8-9]提出的一种基于用户分组以及组内干扰消除的两级预编码方式,同样能够有效地应对大规模 MIMO 下行传输过程中导频开销过大问题。

### 2.1 BDMA 下行传输

在这节中,我们考虑远场散射环境,即散射体远离基站,基站端角度扩展(AS)相对较小的环境。可以证明:当天线数趋于无穷时,波束域信道可以由实际物理信道右乘离散傅立叶变换(DFT)矩阵得到,利用第三代合作伙伴项目(3GPP)的空间信道模型(SCM),可以产生基站天线数目 64,用户为 10 的实际用户信道,并且还可以利用 DFT 矩阵转换成波束域信道,转换后的波束域信道能量分布见图 4。

从图 4 可以看到:每个用户波束域信道的信道能量只集中于少数几个波束,例如,用户 1 的信道能量主





▲图4当  $M=64, K=10$  时的波束域信道能量分布与索引

要集中于第 30、31 个波束上, 用户 2 的信道能量主要集中于第 34、35 个波束上。正是由于波束域信道的这种稀疏特性, 使得用户信道的压缩成为可能。用户的波束信道能量分布可以通过统计 CSI 来获知, 由文献 [10] 和 [15] 可知, 用户的统计 CSI 独立于子载波, 并且相对于瞬时 CSI 来说变化速度比较慢, 所以获取统计 CSI 的开销就会大大减小, 从而变得可以接受。

在基站获取到统计 CSI 之后, 如何进行用户调度和用户波束的分配显得非常重要。在文献 [7] 中已经证明, 当不同用户使用的波束集合交集为空时, 为最优传输。我们采用一种贪心算法, 并根据用户统计 CSI 进行用户调度以及用户波束的选择, 在很小的算法复杂度下达到了很好的效果。图 5 分别显示了被调度用户所占波束的信道能量和各用户占用波束的索引。由图 5 可见: 在 10 个用户中, 只有 4 个用户被调度, 每个用户占用 4 个波束, 并且各个用户占用的波束都不重叠。

根据 BDMA 下行传输方案, 用户调度之后, 基站需要在波束域信道发送导频, 以便让用户进行信道估计以获取波束域瞬时 CSI。由于调度后的不同用户波束域信道几乎正交, 而且维度很小, 所以获取波束域瞬时 CSI 的开销将变得非常小。一旦用户得到了波束域信道的瞬时 CSI, 便可以

与基站在波束域信道上进行数据的传输。

### 2.2 两级预编码

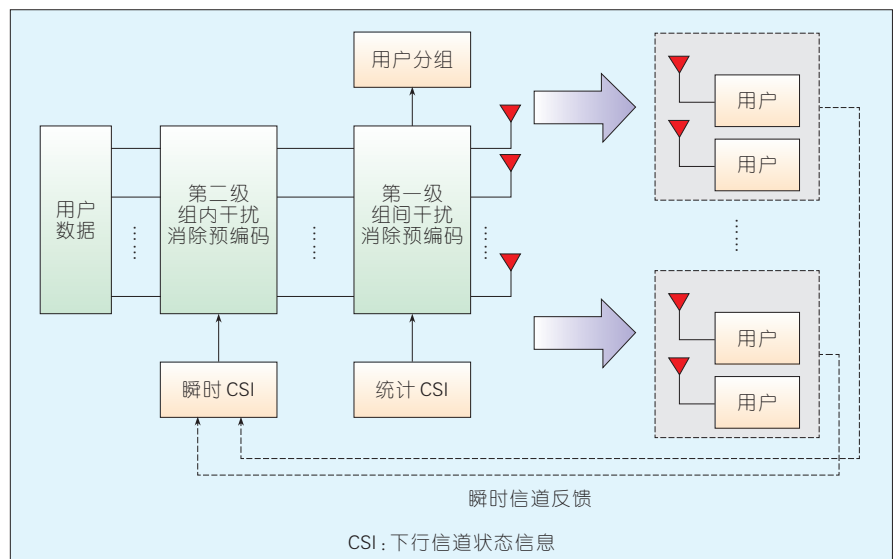
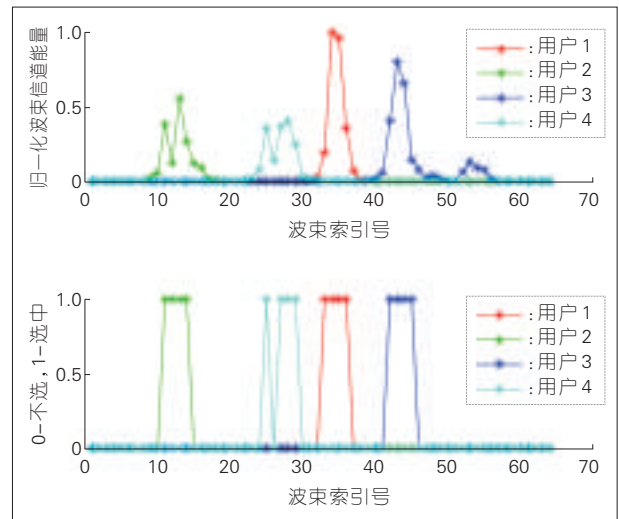
不同于 BDMA 下行传输, 基于用户分组的两级预编码方法利用聚类算法根据统计 CSI 进行用户的分组操作, 使得信道空间特性相似的用户被分成一个组, 由于不同的组之间信道的正交特性, 大规模 MIMO 被等效成多个小规模 MIMO 传输问题。第一级预编码将大维度的信道矩阵进行了块对角的转换, 对角线上的每个块为一个等效分组信道, 利用这种转化达到组间干扰消除的目的。第二级预

编码只需获得小维度的等效分组信道信息后, 便可以进行组内干扰消除预编码, 如 RZF 预编码等。两级预编码系统结构如图 6 所示。图 7 为在基站天线数目 64、用户数目 20 的场景下, 两级预编码和完整信道 RZF 预编码算法的性能对比图。可以看到, 两级预编码在有效地降低信道估计开销的同时, 性能接近于知道完整 CSI 情况下的 RZF 预编码。

### 3 结束语

文章中我们首先回顾了大规模 MIMO 下行链路中几种传统的预编码算法, 并做了相应的对比分析。针对

图 5 用户占用的波束域信道能量与索引



▲图6 两级预编码系统结构

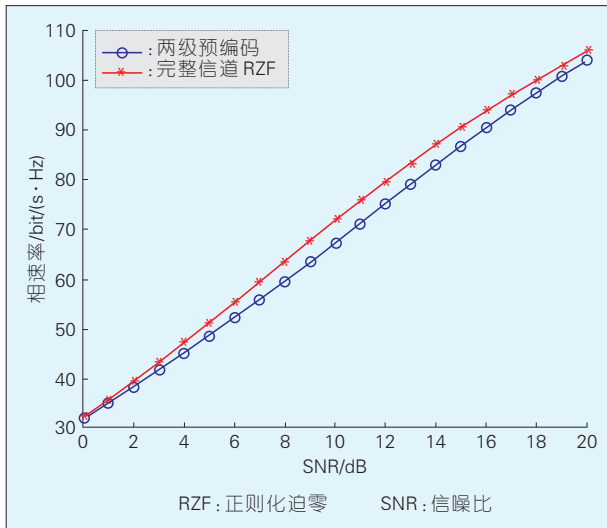


图7  
两级预编码与RZF预编码  
和速率性能对比

传统预编码所需完整瞬时CSIT无法获取的问题,研究了两种针对大规模MIMO提出的预编码方法:BDMA下行传输方法,通过简单高效的贪婪算法进行用户调度和波束分配,使不同的用户在正交的波束上进行传输;基于用户分组的两级预编码方法,则是利用聚类算法将信道特性相似的用户分为一组,基站进行第一级组间干扰消除预编码,基站获取分组的等效瞬时信道后,再进行第二级组内干扰消除预编码。这两种方法都能够有效地解决大规模MIMO中导频开销过大的问题。

#### 参考文献

- [1] MARZETTA T L. Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2010, 9(5): 3590–3600. DOI:10.1109/TWC.2010.092810.091092
- [2] RUSEK F, PERSSON D, LAU B K, et al. Scaling up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(1): 40–60. DOI: 10.1109/MSP.2011.2178495
- [3] NGO H Q, LARSSON E G, MARZETTA T L. The Multicell Multiuser MIMO Uplink with Very Large Antenna Arrays and a Finite-Dimensional Channel [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(6): 2350–2361. DOI: 10.1109/TCOMM.2013.032713.120408
- [4] ASHIKHMIN A, MARZETTA T L. Pilot Contamination Precoding in Multi-Cell Large Scale Antenna Systems[C]//2012 IEEE International on Information Theory Proceedings. USA: IEEE, 2012: 1137–1141. DOI: 10.1109/ISIT.2012.6283031
- [5] JINDAL N. MIMO Broadcast Channels with Finite-Rate Feedback [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(11): 5045–5060. DOI: 10.1109/TIT.2006.883550
- [6] 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 Journal Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 802–814, Mar. 2014. DOI: 10.1109/JSTSP.2014.2313020
- [7] SUN C, GAO X, 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
- [8] ADHIKARY A, NAM J, CAIRE G. Joint Spatial Division and Multiplexing—The Large-Scale Array Regime [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 59(10): 6641–6643. DOI: 10.1109/TIT.2013.2269476
- [9] NAM J, ADHIKARY A, AHN J, et al. Joint Spatial Division and Multiplexing: Opportunistic Beamforming, User Grouping and Simplified Downlink Scheduling [J]. IEEE Journal Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 876–890. DOI: 10.1109/JSTSP.2014.2313808
- [10] ADHIKARY A, SAFADI A E, SAMIMI M, et al. Joint Spatial Division and Multiplexing for mm-Wave Channels [J]. IEEE Journal Selected in Areas Communications, 2014, 32(6): 1239–1255
- [11] KIM D, LEE G, SUNG Y. Two-Stage Beamformer Design for Massive Downlink by Trace Quotient Formulation [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(6): 2200–2211. DOI: 10.1109/TCOMM.2015.2429646
- [12] LIU A, LAU V. Two Stage Cosnt-Envelope Precoding for Low Cost Massive MIMO System [J]. IEEE Transactions on Signal Process, 2015, 99: 1–1. DOI: 10.1109/TSP.2015.2486749
- [13] PEEL C B, HOCHWALD B M, SWINDELHURST A L. A Vector-Perturbation Technique for Near-Capacity

Multiantenna Communication, Part I: Channel Inversion and Regulation [J]. IEEE Transactions Communications, 2005, 53(1): 195–202. DOI: 10.1109/TCOMM.2004.840638

[14] SPENCER Q H, SWINDELHRST A L, HAARDT M. Zero-Forcing Methods for Downlink Spatial Multiplexing in Multiuser MIMO Channels [J]. IEEE Transactions on Signal Process, 2004, 52: 461–471. DOI: 10.1109/TSP.2003.821107

[15] LIU K, RAGHAVAN V, SAYEED A M. Capacity Scaling and Spectral Efficiency in Wideband Correlated MIMO Channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(10): 2504–2526. DOI: 10.1109/TIT.2003.817446

#### 作者简介



陆晨,东南大学移动通信国家重点实验室硕士研究生;研究方向为宽带大规模MIMO无线通信。



王闰今,东南大学移动通信国家重点实验室副教授;研究方向为无线通信中的信号处理、5G移动通信关键技术。



高西奇,东南大学教授、博士生导师,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。