



专题:未来网络

5G 无线通信网络物理层关键技术

倪善金,赵军辉

(北京交通大学电子信息工程学院 北京 100044)

摘要:信息社会日益增长的需求,促使着无线通信技术的不断发展。计划于 2020 年进入商业运营的 5G 无线通信技术,尚在探索和研究阶段。从无线通信的发展历程出发,介绍了当前国内外的无线通信发展的最新趋势,然后从频谱资源紧缺、系统容量亟需提高的角度,着重介绍了两个关键的物理层技术——毫米波通信技术和大规模 MIMO 技术,以应对未来无线通信的发展要求。此外,还概括性地介绍了 5G 无线通信系统的应用场景以及未来的发展趋势。

关键词: 5G;毫米波通信;大规模 MIMO;应用场景;发展趋势

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015322

Key Technologies in Physical Layer of 5G Wireless Communications Network

Ni Shanjin, Zhao Junhui

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The continuously increasing demand of wireless communications impels the fast development of the next generation wireless communication technology. The 5G communication technology, which scheduled to be commercialized in the year beyond 2020, is still on its earlier stage. Based on the development history of wireless communications, the latest trend in the development of the wireless communications at home and abroad was presented. In order to solve the shortage of spectrum resources and improve the capacity of system, two key technologies of physical layer (millimeter-wave communications and massive MIMO) were introduced and remarked. Furthermore, the scenarios and development trend of 5G mobile communication systems in the future were also described.

Key words: 5G, millimeter-wave communication, massive MIMO, application scenarios, development trend

1 引言

无线通信是一个充满生机而又有无限发展可能的领域。从第一代模拟调制通信系统到第二代数字调制系统;从最初仅能支持少量的数据业务到今天实现视频、音频、

图片等多媒体数据业务的快速传输,无线通信技术正在发生着深刻的变革。

信息社会的快速发展、人们越来越高的通信要求、数据的指数式增长,促使着无线通信技术以前所未有的速度向前发展。1991 年第二代(2G)移动通信技术兴起到 2001 年

收稿日期:2015-10-10;修回日期:2015-12-07

论文引用格式:倪善金,赵军辉. 5G 无线通信网络物理层关键技术. 电信科学, 2015322

Ni S J, Zhao J H. Key technologies in physical layer of 5G wireless communications network. Telecommunications Science, 2015322

3G系统的出现,无线通信网络从一个单纯的技术系统向能够传输大量多媒体数据服务网络的方向发展^[1]。2008年4G移动通信系统开始进入人们的视野,如今LTE-Advanced进入商业运营,逐渐成为人们生活的一部分。4G时代的无线通信技术在频谱效率、传输速率、系统性能等方面较3G有较大幅度的提高,但是仍存在诸如无线频谱资源的严重短缺、用户数目的无限制增加、数据流量的爆炸式增长等悬而未决的问题,促使着研究人员不得不思考“下一代移动通信系统将会怎样”。

虽然5G系统尚处于论证、试验阶段,技术标准尚未制定,但它俨然成为世界各国移动通信领域的研究热点。2012年9月,欧盟启动了“5G NOW”的研究课题,11月启动了名为“METIS”的5G研发项目。中国于2013年启动围绕5G的“863”计划重大项目,并成立IMT-2020(5G)推进组,开始国家5G标准化研究工作。韩国和日本也相继成立了各自的5G工作组。这些组织与机构正就5G发展方向、关键技术、选用频段、应用场景等进行试验与研究,计划于2018年形成统一的标准,2020年进入商业运营。

5G的目标是实现无缝、可靠的全球互联互通,并有效地改善当前的网络状况,解决4G发展困境,满足未来信息社会的大数据需求,实现“信息随心至,万物触手及”的愿景。未来5G的新特点主要有以下几个方面。

(1) 利用更高的频谱资源

当今全球利用的频谱资源主要集中于300 MHz~3 GHz^[2],频谱资源的严重短缺促使研究者转向未被利用的3~300 GHz频谱,用于未来5G移动通信的建设^[3]。

(2) 更大的系统容量

随着移动互联网的蓬勃发展,信息社会将进入大数据时代。预计到2020年,总的移动通信数据量将实现千倍增长,用户数据速率和设备互联的数量会达到今天的百倍以上,这势必要求5G移动通信系统拥有更大的系统容量,来满足未来社会的发展要求。

(3) 更好的用户体验

用户对数据速率的需求不会无限制增长,当数据速率增长到可以满足绝大多数移动数据业务和应用的需求时,人们追求更多的是最佳的用户体验。高效、安全、实时、稳定的无线网络环境,随时随地的最佳体验,将会成为未来网络的发展主流。

(4) 更低的能量损耗

能量损耗已成为当今世界迫切需要解决的问题,未来

无线通信势必将向着绿色通信、环境友好通信方向发展。在满足业务量增长需求、服务质量和用户体验的前提下,应该考虑如何实现能源消耗的最小化。

2 5G物理层关键技术

每一代通信网络的发展都会伴随着关键技术的兴起。新的技术将会满足这个时代的网络通信需求,并推动着网络继续向前发展。同样,5G的发展与部署也离不开关键技术的支撑。这一节将介绍两种5G物理层关键技术——毫米波通信技术和大规模MIMO(multiple-input multiple-output)技术。

2.1 毫米波通信

通信技术的发展依赖大量可利用的频谱资源,然而目前几乎所有的商业无线通信工作频段都集中在300 MHz~3 GHz频段,而3~300 GHz(毫米波)频段的利用率较低,如何有效地利用该频段资源,有助于解决频谱资源短缺问题,同时还将会满足未来大数据的传输要求,提高网络传输效率。

当前5G毫米波通信技术尚在论证试验阶段。参考文献[3]指出三星研究人员设计了一种能够工作在毫米波频段的波束成形天线,在2 km的距离上实现了1 Gbit/s以上的数据传输速率。参考文献[4]中,研究者在28 GHz和38 GHz频段进行了传播测量试验,得到了到达角、均方根时延拓展、路径损耗、建筑物穿透和反射特性等测量数据。这些数据对发展城市统计信道模型以及5G毫米波移动通信有较高的参考价值。然而,发展毫米波通信的道路并非一帆风顺,仍然存在诸多问题需要解决,主要包括毫米波传播过程中的路径损耗、建筑物穿透损耗、雨衰等。

2.1.1 路径损耗

路径损耗是由发射功率的辐射扩散以及信道的传播特性造成的。路径损耗问题是无线通信中普遍存在的问题,发射信号在无线信道传播过程易受到噪声、干扰和其他信道的影响,同时信号自身也会存在导致损耗的因素。自由空间路径损耗模型可以表达为:

$$P_L(\text{dB}) = 32.44 + 20 \ln d + 20 \ln f \quad (1)$$

其中, d 的单位为km, f 的单位是MHz。

由式(1)可以看出,随着波长 λ 的减小或者频率 f 的增加会导致自由空间传播损耗变大。也就是说,在一定的传播距离内,频率越高,损耗越大。与300 MHz~3 GHz频段相比,毫米波频段有更大的自由空间传播损耗。通过在



高频段运用大规模接收发射天线^[2],进行波束成形,将能量集中到很小的区域,获得较高的增益,可以解决自由空间传播损耗较大的问题。

2.1.2 建筑物穿透损耗

信号在穿透建筑物时会有一定的损耗,低频段信号更容易穿透建筑材料,且造成的损耗较小。毫米波穿透损耗较大且传播距离较低,频段小。

较高的穿透损耗可能会导致信号无法穿透建筑物进入室内,或者使室内的接收信号变得非常微弱。可以通过在室内建立 Wi-Fi 节点或者毫微微蜂窝的方式,保证室内通信质量。参考文献[5]指出,基于 IEEE 802.11ad 协议的下一代 Wi-Fi 技术,可以在 60 GHz 频段下实现最低 1 Gbit/s 的传输速率,并且可以传输无压缩视频。

2.1.3 雨衰

毫米波通信需要考虑无线信号在该频段的传播特性,雨衰是毫米波通信必须考虑的因素。它会限制无线系统的传播路径长度,降低系统的可靠性,限制高频段视距微波链路的使用。当雨量较大时,会对毫米波通信系统产生严重的干扰。雨滴的大小几乎与发射波长相同,因此很容易产生散射。参考文献[6]给出了基于地理观测降雨速率、降雨结构、大气温度的垂直变化情况平均雨衰理论预测模型,该模型为:

$$A_R = aR^b \left[\frac{e^{ubd}-1}{ub} \right] (0 \leq D \leq d) \quad (2)$$

$$A_R = aR^b \left[\frac{e^{ubd}-1}{ub} - \frac{B^b e^{cbd}}{cb} + \frac{B^b e^{cbD}}{cb} \right] (d \leq D \leq 22.5 \text{ km}) \quad (3)$$

2.2 大规模 MIMO 技术

2.2.1 大规模 MIMO 简介

MIMO 技术在提高系统频谱效率、高速数据传输、提高传输信号质量、增加系统覆盖范围和解决热点地区的高容量要求等方面有无可比拟的优势,现已广泛应用于各种移动通信系统中,如 3G、LTE、Wi-Fi 等。然而,传统的 MIMO 技术存在硬件复杂度增加、信号处理复杂度增加、能量消耗等问题,同时需要更多的物理空间来容纳较大尺寸天线,产生了额外的土地租赁费用^[7]。除此之外,随着移动互联网和云计算为代表的业务的数据业务的指数式增长,传统的 MIMO 技术已然不能满足人们日益增长的支持图片、视频和互联网接入等更高速率数据业务的要求。

2010 年,贝尔实验室的 Marzetta 提出了在基站侧设置大规模天线代替现有的多天线技术,使得基站天线数量远

大于其能够同时服务的单天线移动终端数目^[8],由此形成大规模 MIMO 无线通信理论。大规模 MIMO 技术不需要大面积地更新用户终端设备,通过对基站的改造,能有效地提高系统容量和频谱效率。大规模 MIMO 基本模型如图 1 所示。

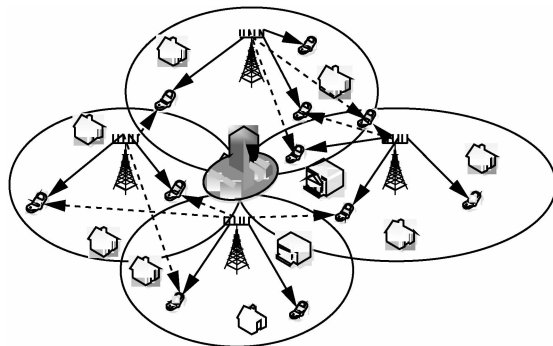


图 1 大规模 MIMO 基本模型

与传统的 MIMO 技术相比,大规模 MIMO 具有以下几点优势^[9]。

- 相对于通过减小小区尺寸的方式来提高系统容量,大规模 MIMO 系统直接通过增加基站天线数目来提高系统容量,降低了实现复杂度,较大幅度地提高了系统容量。
- 系统可以采用价格低廉、输出功率在毫瓦级别的放大器元件来搭建,降低了发射功率消耗和产品代价。
- 理论证实,当天线数量足够大时,噪声和不相关干扰都可忽略不计,并且最简单的线性预编码和译码算法趋于最优^[7]。

2.2.2 信道状态信息的获取

大规模 MIMO 技术的研究是一个新兴领域,虽然取得了可喜的进展,但仍有许多问题亟待解决。随着天线数目的不断增加,基站需要精确获取当前的信道状态信息(channel state information, CSI),才能保证系统通信的可靠性^[10]。对于如何获得准确的信道状态信息,目前大多数研究都是基于时分双工(time division duplex, TDD)系统,利用上行信道与下行信道在相关时间内信道状态的互易性原理来获得期望 CSI^[11-13]。

与频分双工(frequency division duplex, FDD)系统通过终端用户进行信道估计得到的有限反馈信息来获得期望 CSI 的方式不同,基于信道互易的 TDD 系统能够有效减小信道开销,同时不需要建立复杂的反馈机制,基站天线数目也因此不受限制。然而,根据互易性原理的特性,很难支持高速移动场景下的通信。上行训练中,终端用户需要向

各自的基站发送导频信号,以此来进行信道估计,然而导频信号的空间维数有限,不可避免地存在不同小区的用户采用相同导频同时向基站发射,导致基站无法区分,造成导频污染问题。导频污染不会随着基站天线数目的增加而消失^[7],参考文献[14]指出,相较于有着相同方差的加性噪声,导频污染对系统性能有着更为严重的影响,当前解决导频污染的方法主要有干扰抵销法^[15,16]、预编码方法^[17,18]、盲估计方法^[19]、基于传输协议的方法^[20,21]等。

在大规模 MIMO 系统的下行数据传输过程中,一般会受到 3 种干扰因素的影响:小区内干扰、非相干干扰和有导频污染引起的区间干扰。参考文献[13]给出了在这 3 种干扰因素存在的情况下系统容量计算式:

$$R = K \left(1 - \frac{QK}{T} \right) \ln \left(1 + \frac{(M-1)\sigma_r^2}{1/\rho\beta_0 + C_1 + C_2 + C_3} \right) \quad (4)$$

其中, C_1 为小区内干扰, C_2 为非相干干扰, C_3 为由导频污染引起的区间干扰,它们的计算式分别为:

$$C_1 = K - \sigma_r^2 \quad (5)$$

$$C_2 = K \sum_{j \neq 0} \left(\frac{j^2 d^2}{d_0^2} + 1 \right)^{-\frac{\alpha}{2}} - \sigma_r^2 \sum_{l \neq 0} \left(\frac{l^2 Q^2 d^2}{d_0^2} + 1 \right)^{-\alpha} \quad (6)$$

$$C_3 = (M-1)\sigma_r^2 \sum_{l \neq 0} \left(\frac{l^2 Q^2 d^2}{d_0^2} + 1 \right)^{-\alpha} \quad (7)$$

此外, Q 为导频复用因子, K 为终端用户数, M 为基站天线数目, σ_r^2 为归一化估计功率,其计算式为:

$$\sigma_r^2 = \left(1 + \sum_{l \neq 0} \left(l^2 Q^2 \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 + 1 \right)^{-\alpha/2} + \frac{1}{\beta_0 \rho_\tau K Q} \right)^{-1} \quad (8)$$

根据式(4),可以得到在不同终端用户数目情况下系统和速率随基站天线数目的变化情况,如图 2 所示。当基站天线数目为 100、导频复用因子为 2 时,不同相对终端位置下,干扰因素对系统性能影响情况不同。图 3 为归一化处理后,干扰因素对系统和速率影响的趋势。

2.3 大规模 MIMO 在高频段的应用

随着基站天线数目的不断增大,给设备的系统处理能力、外观设计、部署、网络建设等带来了一定的困难。由于系统运行的频率决定着天线的尺寸和配置方式,在高频段天线的间距和尺寸变得更小,工程实现难度降低。未来移动通信系统将采用全新的天线型态设计,使得大规模 MIMO 在未来高频段的利用成为重要的研究方向。然而,大规模天线阵列在毫米波段的应用并不会一帆风顺,仍存在诸如大型

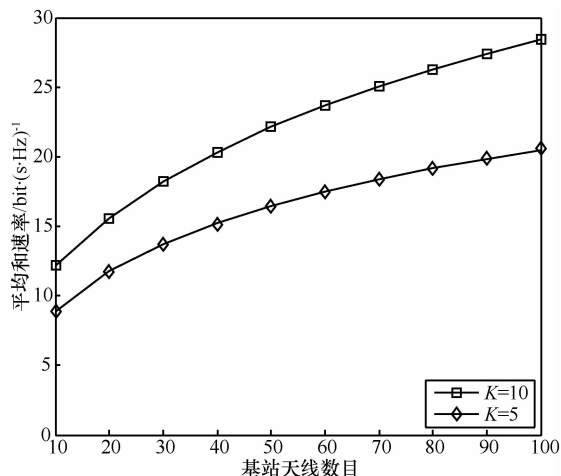


图2 不同天线数目下的平均和速率

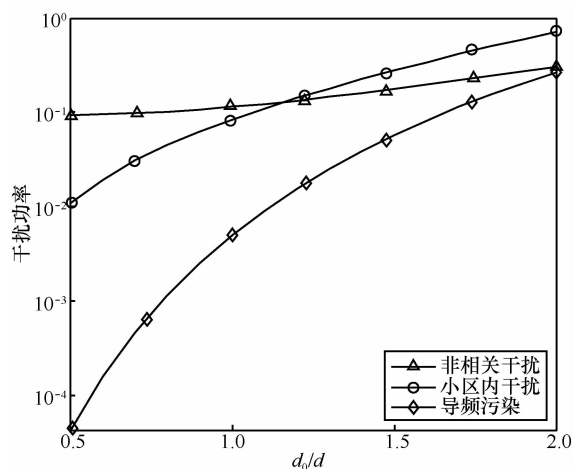


图3 不同终端位置下的干扰因素比较

收发信机的能量损耗、接收天线端的模拟数字转换器(analog to digital converter, ADC)在高采样速率下的高开销以及高性能、高速率模拟数字转换器的研究等。

3 5G 应用场景

与当前的网络不同,5G 网络不但要满足日常的语音与短信业务,还要提供强大的数据业务。提高网络的系统容量是发展 5G 移动通信的根本驱动力,根据香农理论,通信网络总系统容量可以由式(9)来表示^[1]。

$$C_{\text{sum}} \approx \sum_{\text{HetNets}} \sum_{\text{Channels}} B_i \lg \left(1 + \frac{P_i}{N_p} \right) \quad (9)$$

其中, B_i 为第 i 信道的带宽, P_i 为第 i 信道的信号功率, N_p 为噪声功率。由式(9)可以看出,系统的总容量等价于所有子信道和网络的容量。提高网络的系统容量可以从以下几个方面入手。

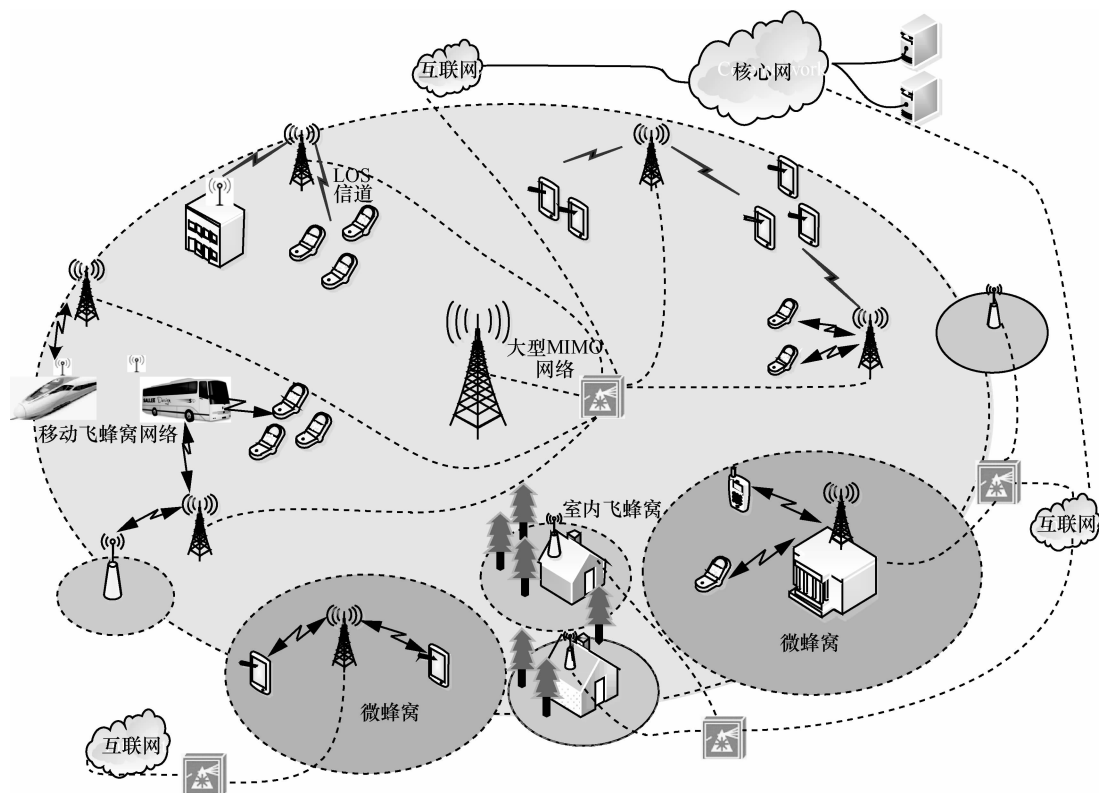


图4 5G 异构网络

- 增加信道的带宽,运用毫米波通信技术、无线电认知技术等来获得更多的频谱资源,提高系统容量。
- 提高信道的信号功率,可以从能量效率、干扰消除、绿色通信等方面来实现。
- 增加信道的子信道数目,可以通过运用大规模MIMO技术、空间调制技术来实现。
- 增加网络覆盖,通过由宏蜂窝、微蜂窝、微微蜂窝、家庭基站、中继等构成的异构网络来提高系统容量。

未来5G系统的结构必将是多网络的融合,构成一个巨大的异构网络,如图4所示。

5G异构网络涉及人们的交通、工作、休闲和居住等各个场景,特别是密集住宅区、办公室、体育场、露天集会、拥挤的交通、地铁、高速铁路、广域覆盖以及特殊情况下的通信场景,这些场景具有超高移动性、超高连接数密度、超高流量密度、超复杂通信状况等特点,可能对未来5G网络构成巨大的挑战。

4 结束语

5G移动通信系统将会满足未来移动互联网业务飞速发展需求,实现多业务多技术的融合,达到最佳的用户

体验。根据移动通信的发展规律,预计5G移动通信技术将在2018年进入测试阶段,2020年进入商业运营。今后几年将是确定5G移动通信系统的关键技术、使用频段、技术指标、发展方向的关键时期。届时,通信系统的频谱效率、能耗效率将得到根本的提高;现有的网络体系将会得到重新整合,标准将会趋向统一;网络结构将会更加灵活高效,以适应即将到来的未知服务;设备终端将更加智能,网络配置和维护的费用将更低。演进、融合和创新将成为面向5G移动通信系统发展的主要路线。本文从5G移动通信系统的发展需求入手,对其物理层关键技术进行了评述,然后简单地介绍了5G通信系统的应用场景。随着对5G通信系统研究的不断深入,各层的关键技术将逐步得以明确,并将于最近几年进入标准的研究和制定阶段。

参考文献

- 1 Wang C X, Haider F, Gao X, *et al.* Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 122~130
- 2 Pi Z, Khan F. An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(6): 101~107

- 3 Bleicher A. The 5G phones future . IEEE Spectrum, 2013, 50(7): 15~16
- 4 Rappaport T S, Sun S, Mayzus R, *et al.* Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work! IEEE Access, 2013(1): 335~349
- 5 Zhao Q L, Li J. Rain attenuation in millimeter wave ranges. Proceedings of 7th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory, Guilin, China, 2006: 1~4
- 6 Rusek F, Persson D, Lau B K, *et al.* Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(1): 40~60
- 7 Marzetta T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590~3600
- 8 Lu L, Li G, Swindlehurst A, *et al.* An overview of massive MIMO: benefits and challenges. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2013, 8(5): 742~758
- 9 Larsson E, Edfors O, Tufvesson F, *et al.* Massive MIMO for next generation wireless systems. IEEE Communication Magazine, 2013, 52(2): 186~195
- 10 Marzetta T L, Caire G, Debbah M, *et al.* Special issue on massive MIMO. Journal of Communications and Networks, 2013, 15(4): 333~337
- 11 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. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Prague, Czech Republic, 2011: 3464~3467
- 12 Yin H, Gesbert D, Filippou M, *et al.* A coordinated approach to channel estimation in large-scale multiple-antenna systems. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31 (2): 264~273
- 13 Li Y, Nam Y H, Ng B L, *et al.* A non-asymptotic throughput for massive MIMO cellular uplink with pilot reuse. Proceedings of IEEE Global Communications Conference (Globecom), Ottawa, Canada, 2012: 4500~4504
- 14 Gopalakrishnan B, Jindal N. An analysis of pilot contamination on multi-user MIMO cellular systems with many antennas. Proceedings of IEEE 12th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), San Francisco, California, USA, 2011: 381~385
- 15 Vu T X, Vu T A, Quek T Q S. Successive pilot contamination elimination in multi-antenna multi-cell networks. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6): 617~620
- 16 Zhang J, Zhang B, Chen S, *et al.* Pilot contamination elimination for large-scale multiple-antenna aided OFDM systems. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 759~772
- 17 Jose J, Ashikhmin A, Marzetta T L, *et al.* Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(8): 2640~2651
- 18 Li L, Ashikhmin A E, Marzetta T L. Pilot contamination precoding for interference reduction in large scale antenna systems. Proceedings of 51 Annual Allerton Conference, Monticello, Mississippi, USA, 2013: 226~232
- 19 Muller R R, Vehkaperä M, Cottatellucci L. Analysis of blind pilot decontamination. Proceedings of Conference on Signals, Systems & Computers, Pacific Grove, CA, USA, 2013, 8(5): 61016~61020
- 20 Appiah K, Ashikhmin A, Marzetta T L. Pilot contamination reduction in multi-user TDD systems. Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), Cape Town, South Africa, 2010: 1~5
- 21 Fernandes F, Ashikhmin A, Marzetta T L. Inter-cell interference in noncooperative TDD large scale antenna systems. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31 (2): 192~201

[作者介绍]



倪善金,男,北京交通大学电子信息工程学院博士生,主要研究方向为大规模 MIMO 无线通信。



赵军辉,男,博士,北京交通大学电子信息工程学院教授,主要研究方向为无线和移动通信(MIMO、OFDM、CDMA、合作通信、中继和认知无线电)、射频识别(定位技术、防撞技术 and 安全协议)和应用开发(停车场管理系统、嵌入式车载防盗系统和 GPS 导航系统开发)等。