



LTE 多天线技术发展趋势

毕 奇, 谢伟良, 陈 鹏

(中国电信股份有限公司技术创新中心 北京 100031)

摘 要: 多天线技术能够在不增加带宽的条件下, 大幅提高系统容量和链路可靠性, 因而成为 LTE 的关键技术之一。多天线技术性能不仅取决于空时信号处理, 天线本身的指标也很大程度上影响其网络部署。概括了当前 LTE 多天线技术的现状, 通过仿真和测试重点分析了 LTE-FDD 覆盖增强多天线技术的性能, 并对多天线技术在 5G 系统的演进和技术挑战进行了介绍。

关键词: LTE; 多天线; 覆盖增强; 大规模 MIMO

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.10.001

Progress and Trends of Multiple Antennas Technology in LTE Network

Bi Qi, Xie Weiliang, Chen Peng

(Technology Innovation Center, China Telecom Co., Ltd., Beijing 100031, China)

Abstract: Multiple antenna technology is considered as one of the few that has the potential to provide relatively large gains in wireless mobile network. The recent progress of using multiple antenna technology in commercial LTE network in China was discussed. By focusing on LTE-FDD network, details of simulation results and measurements from commercial networks were provided to demonstrate the obtainable gains in the real world when compared with theoretical predictions. Based on the current state of art, an outlook at the future trends of the multiple antenna technology with discussions on road maps, challenges and standard progress was given.

Key words: LTE, multiple antennas, coverage enhancement, massive MIMO

1 引言

目前, 第四代移动通信长期演进(long term evolution, LTE)技术正处于全球大规模商用部署阶段, 国内外运营商均在积极建设 LTE 网络, 以满足飞速发展的移动互联网业务需求。与传统 2G 和 3G 系统相比, LTE 系统的特点之一就是采用了多天线技术, 从而突破传统单天线信道容量极限, 有效提高系统频谱效率。

目前无线信号基带处理技术已经成熟, 通过应用先进的信道编码、调制、差错控制等技术, 使得移动通信系统性

能逼近香农理论极限, 单纯通过基带处理技术已经较难大幅提升网络性能。天线作为移动通信的重要环节, 在过去很长一段时间内, 都未被重视。20 世纪 90 年代贝尔实验室关于多天线技术的一系列突破性研究, 包括 Foschini 以及 Telatar 等人对 MIMO 信道容量的研究, 发现了多天线技术的容量在高信噪比下随收发天线数目线性增加^[1-2]。1996 年 Foschini 等首先提出 MIMO 系统的一种实现结构 BLAST^[3-5], 并证明其可将传统无线链路的容量提升 20~30 倍。上述成果极大地开阔了移动通信研究的视野。在此之后, 学术界和工业界掀起了对多天线技术研究和应用的热潮。



2 技术现状

3GPP LTE 技术规范 R8 版本中定义的多天线技术,下行支持 4 天线 4 层发送,上行支持单天线发送。LTE R8 的多天线技术包括发射分集、开环空分复用、闭环空分复用、波束成形等。在中国移动通信集团公司(以下简称中国移动)和大唐电信的共同推动下,R9 版本中下行引入了双流波束成形技术。R10 版本中对多天线技术进行了进一步增强,支持下行最多 8 天线 8 层发送,上行最多 4 天线 4 层发送,峰值频谱效率可提高至下行 30 bit/(s·Hz),上行 15 bit/(s·Hz)^[6]。

多天线技术可以在相同时域和带宽的基础上,通过对空间的利用,显著提升系统容量。但多天线技术的部署涉及运营商天面的工程改造,在天面资源日益受限、天线安装难度大的背景下,如何解决系统增益和多天线的体积及重量,成为实业界研究和讨论的重点。3GPP 在制订 LTE 标准的过程中也考虑到各运营商在部署多天线时的限制。AT&T、CMCC、NTT DoCoMo、Orange、Vodafone 等全球主流运营商共同向 3GPP 提交了有关天线形态的建议^[7],见表 1,以实现多天线技术带来的增益。其中,||表示同极化,X 表示交叉极化。对于天线形态,基本上分为小间距与大间距两钟。若采用小间距,一般选取 0.5λ ;若采用大间距,则一般选取 $4\lambda\sim 10\lambda$ 。

表 1 运营商关于天线形态的建议

天线数配置	天线形态
2 天线	1 列,交叉极化:X 2 列,小间距同极化:
4 天线	2 列,每列交叉极化,小间距:X X 2 列,每列交叉极化,大间距:X X 4 列,每列同极化,小间距:
8 天线	4 列,每列交叉极化,小间距:X X X X 8 列,每列同极化,小间距: 4 列,每列交叉极化,大间距:X X X X 4 列,每列交叉极化,2 组小间距阵列间大间距排列:X X X X

2.1 TD-LTE 多天线波束成形技术

在 TD-SCDMA 部署的基础上,中国移动在国际上率先提出并部署了 TD-LTE 的 8 天线技术方案。该方案采用 4 列双极化振子水平排列,振子间距 0.5λ ,下行通过 8 天线进行波束成形,上行通过 8 天线进行分集接收。天线结构如图 1 所示。

天线间距的大小决定了天线的宽度,同时还会影响到各列天线的性能指标。中国移动双极化智能天线^[8]采用波束成形技术。由于各阵列之间的互耦,单阵列的天线水平

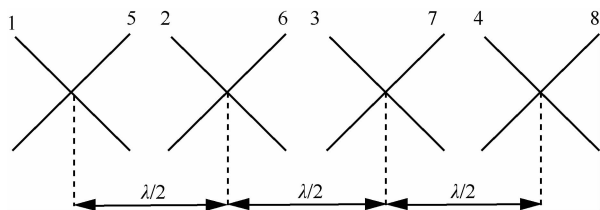


图 1 双极化智能天线示意

面方向图与常规双极化天线存在较大差异,水平面波束宽度变宽,天线增益降低,并伴有波束指向偏斜,测试结果如图 2 所示。为了补偿,单阵列水平面波束宽度变宽的问题,TD-LTE 的广播和控制信道的波束宽度进一步通过静态波束成形来解决。

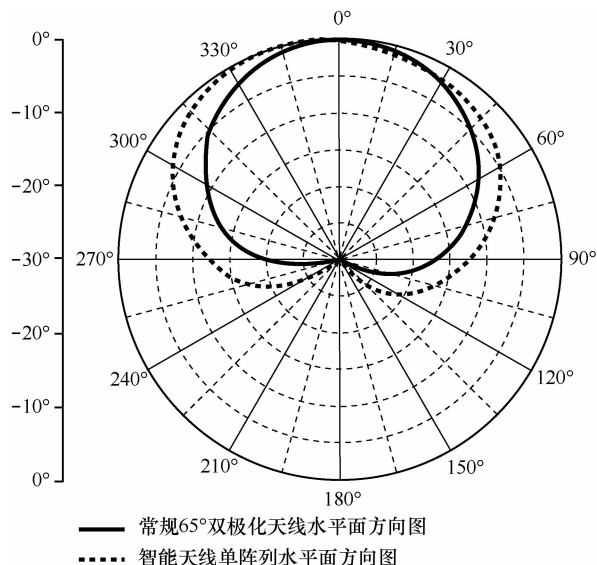


图 2 常规 65°双极化天线与智能天线单阵列水平面方向图

从上述分析和测试结果可以看出, 0.5λ 小间距的多天线技术方案适合于下行波束成形技术。上行采用分集接收时,由于多根天线的水平面方向图存在偏差,波束指向偏斜,导致上行分集效果变差,影响基站扇区覆盖性能。

2.2 LTE-FDD 多天线覆盖增强技术

为了解决高频组网的覆盖问题,中国电信集团公司(以下简称中国电信)进行了多天线覆盖增强技术研究。与 TD-LTE 的多天线技术聚焦下行速率方案不同,LTE-FDD 覆盖增强技术聚焦上行分集增益。从天线设计来说,分集技术要求天线每阵列的相关性越小越好。理论分析表明,天线阵列的最佳间距为 10λ 。然而, 10λ 天线间距会导致天线体积和重量过大,无法在实际工程中安装。因此,在保证各阵列天线技术参数满足系统要求的条件下,尽量减少天线间距,成为中国电信技术创新中心“蓝极光”计划的研究

内容之一。

2.2.1 天线测试

表 2 列出不同阵列间距的 8 天线样机测试结果。随着阵列间距增大,天线水平波束宽度变窄,天线增益提高。阵列间距为 0.5λ 时,天线水平波束宽度为 77° ,超出传统 65° 水平波束宽度指标 18%。测试表明,当天线间距大于 0.8λ 时,天线单阵列的性能指标基本能够达到传统天线指标要求。

2.2.2 仿真分析

除了天线性能指标外,通过进一步应用 Atoll 网络规划软件仿真,得到不同天线指标对系统性能的影响结果。仿真采用的 8 天线参数见表 3,仿真结果见表 4。

与传统 10λ 天线性能相比,当 8 天线阵列间距为 0.5λ 时,由于水平面波束宽度展宽导致天线增益下降,小区上下行平均吞吐率和边缘用户吞吐率与参考天线相比,均有下降;当阵列间距为 0.8λ 时,由于水平面波束宽度和参考天线相当,小区上下行平均吞吐率和边缘用户吞吐率与参考天线相似。

从上述结果可以看出,天线阵列间距在仿真中对吞吐量的影响并不大。但仿真结果与信道建模有很大关系。由

于目前所有的信道建模,包括 3GPP 的信道建模,都与实际信道有较大差别,使得仿真结果对实际的指导意义有极大的不确定性。为了论证多天线技术在实际应用中的效果,中国电信在国际上率先部署了规模 LTE-FDD 8 天线网络,并联合业界主流厂商在多个城市进行了一系列测试,包括实验室测试、单站测试、多站多干扰源测试、连续组网测试以及规模过百站的商业混合组网测试,系统和全面地研究了 LTE-FDD 多天线技术在实际组网环境中的性能。

2.2.3 测试结果

由于篇幅关系,这里主要给出实验室测试和商用混合组网测试结果。实验室测试主要是验证基站在标准信道模型和一定的干扰条件下,采用 MRC 和 IRC 算法,8 天线接收相比 2 天线接收的 SNR 增益,测试结果如图 3、图 4 所示。

从图 3、图 4 可以看出,在实验室测试条件下,当使用 MRC 算法时,厂商设备的平均 SNR 增益能达到 6.5 dB;当使用 IRC 算法时,厂商设备的平均 SNR 增益能达到 7 dB。

如前所述,由于目前信道建模与实际信道差距甚远,仿真和实验室都只能得到在理论信道模型条件下的性能增益。该增益并不代表实际网络能够获得相应的增益。为

表 2 LTE-FDD 不同阵列间距天线样机性能测试结果

天线指标名称	天线指标要求 ^①	0.5λ	0.6λ	0.8λ	0.9λ
增益/dBi	≥16.5	15.5	16	16.8	17
水平面波束宽度	65°±6°	77°	73.8°	63.3°	63.1°
垂直面波束宽度	≥7°	6°	6.2°	7°	7°
前后比/dB	≥25	28	29	32	34
轴向交叉极化比/dB	≥15	19.9	16.8	32.5	25.2
±60°交叉极化比/dB	≥10	7	5.4	17.7	14.9
上旁瓣抑制/dB	≥17	19	13.9	20.4	20.7
驻波比	≤1.5	1.45	1.49	1.29	1.29
隔离度/dB	≥28	30	32	43	41
三阶互调/dBm	≤-107	-95	-100	-117	-114

表 3 仿真天线关键技术指标

天线编号	阵列间距	频率范围/MHz	增益/dBi	水平面波束宽度	垂直面波束宽度	内置电下倾
1	10λ	2 500~2 690	17	65°	6°	6°
2	0.5λ	2 500~2 690	15.50	95.50°	6.05°	6°
3	0.8λ	2 500~2 690	17.32	64.46°	5.85°	6°

表 4 阵列间距对网络性能影响仿真结果

天线编号	小区平均吞吐量/(Mbit·s ⁻¹)		小区边缘吞吐量/(kbit·s ⁻¹)	
	DL	UL	DL	UL
1	16	13	540	423
2	15	12	500	393
3	16	13	551	445

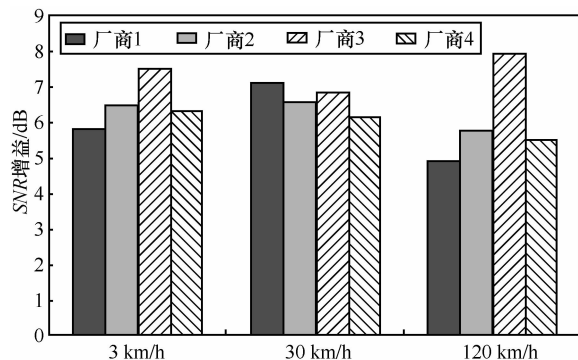


图3 MRC算法,当MCS=4时,8天线/2天线SNR增益测试结果

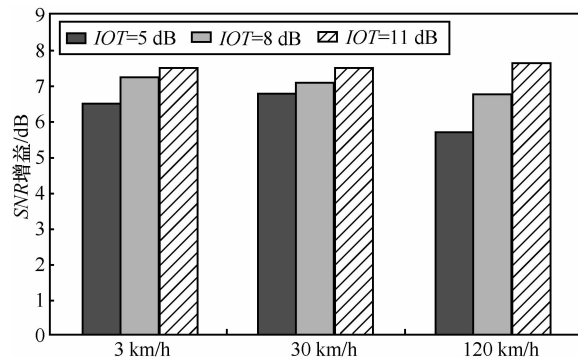


图4 IRC算法,当MCS=4时,8天线/2天线SNR增益测试结果

此, 中国电信对8天线的性能进行了大量外场测试。图5给出一般市区混合组网环境下接收信号强度(RSRP)的比较。该测试区域面积约30 km², 测试区域内有36个2T8R小区及74个2T2R小区。测试路线遍历测试区域的主要道路, 获得有效采样点8万个。通过选择测试区域, 从图5可以看出, 测试区域中2天线与8天线覆盖情况基本一致, 具备性能对比条件。

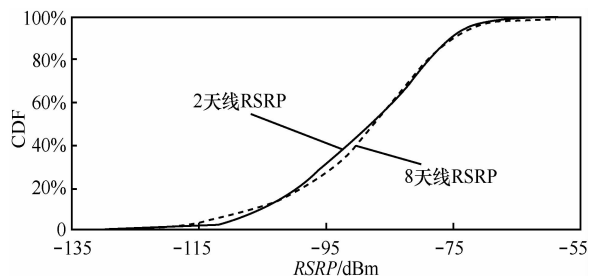


图5 混合组网测试RSRP CDF曲线

为了更合理地对比2天线与8天线接收在实际网络中的性能, 将2天线与8天线的接收信号对齐, 选择在同样导频接收信号强度RSRP条件下来进行比较。结果如图6、图7所示。

从图6、图7中可以看出, 在不同的无线环境下, 8天线技术的增益以不同方式体现。在网络覆盖较差的边缘区域 ($RSRP < -95$ dBm), 8天线技术相比于2天线技术上行速率提升显著, 终端发射功率相当。在网络覆盖较好的中近区 (-85 dBm $< RSRP < -75$ dBm), 8天线技术相比于2天线技术的增益分别体现在上行速率提升和终端发射功率的降低。在网络覆盖近点 ($RSRP > -75$ dBm) 8天线技术相比于2天线技术的增益全都体现在终端发射功率降低。

3 大规模MIMO技术

3.1 概述

目前由于天线尺寸的限制, LTE商用系统的下行波束成形和上行的分集接收天线数都被限制在8个。中国移动与中国电信在TD-LTE和LTE-FDD的多天线的商业应用尝试中, 都走在了世界的前列。由于增加天线数目具有提

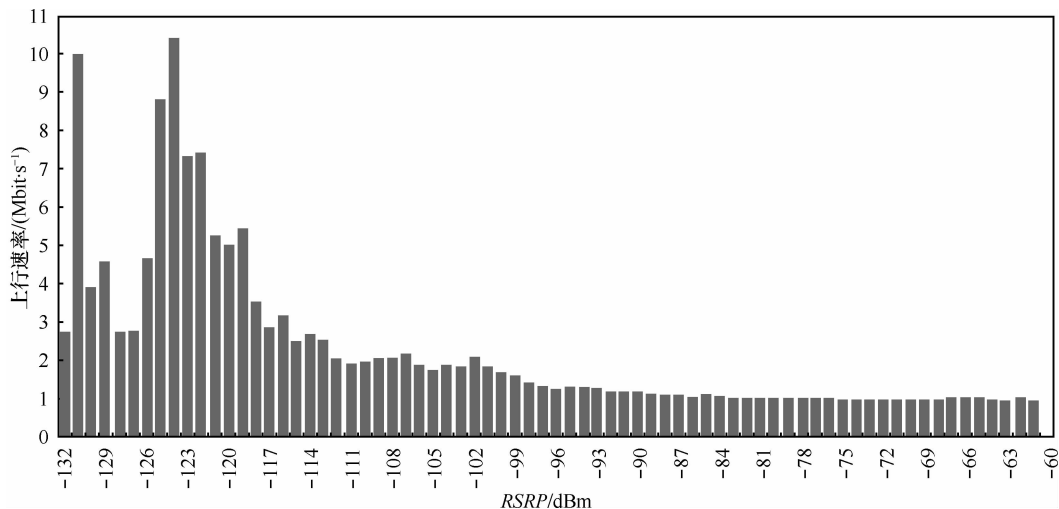


图6 混合组网下2天线与8天线上行速率性能对比

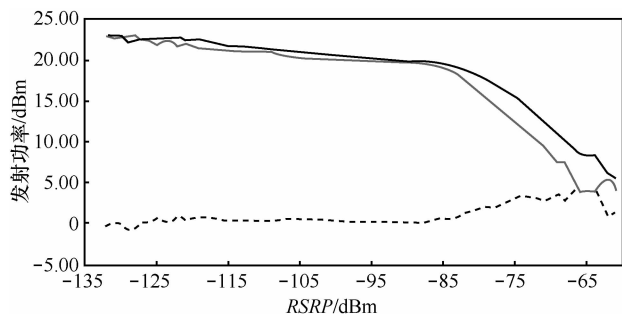


图7 混合组网下2天线与8天线上行终端发射功率对比

升移动通信系统性能的潜力,国际上对下一代移动通信的研究重点之一,聚集在进一步大规模地增加天线数目的目标上^[10-17]。从目前来说,大规模 MIMO 的应用场景和天线数目,主要与下一代移动通信的频段发放有关。在保持天线尺寸与目前相当条件下,通信频段选取得越高,可增加的天线数也就越多。对于低频段,大规模 MIMO 的部署可能需要通过使用传统天线原有的振子数来解决。在这样的条件下,大规模 MIMO 技术的增益必须同时补偿从传统天线原有振子能够得到的天线增益。

3.2 大规模 MIMO 的设计趋势

在前面章节,谈到天线的两种形态。对于中国移动推进的 8 天线 TD-LTE 系统,系统增益主要聚焦于波束成形。因此基站端天线不同阵列之间需要具有高相关性。天线阵列的间距采用 0.5λ 波长来设计。对于中国电信尝试的 LTE-FDD 的 8 天线系统,系统增益主要通过分集技术。基站端天线之间需要具备低相关性。虽然理论上,低相关性天线阵列之间的间距应该按 10λ 来设计,但实际部署表明,大约 0.8λ 的天线设计能够获得可接受的商用天线设计方案。

根据理论分析,MIMO 的增益主要来源于 3 个方面,即波束成形(包括预编码)、空间复用(spatial multiplexing)以及分集(diversity)^[18,19]。其中第一个方面需要高相关度的天线阵列,而后两种用低相关的阵列更为有利。尽管在基带处理方面,可根据获得的信道矩阵,信号处理时用不同的算法在这 3 种形态下自由切换,但对天线设计来说,确定的天线形态将决定主要增益的来源。从目前的趋势来看,对下一代移动通信系统中大规模 MIMO 的天线选取,更多厂商趋向于采用高相关性天线阵列^[20]。因此,下一代大规模 MIMO 的主要增益来源极可能将通过多用户预编码的方式,利用与波束成形等效的方法获得。

3.3 大规模 MIMO 技术的应用场景

大规模 MIMO 技术的应用场景如图 8 所示。作为 4G MIMO 技术的扩展,大规模 MIMO 的潜在应用场景包括城区宏覆盖、城区微覆盖及郊区覆盖。其中,将大规模 MIMO 应用于用户密度较大的城区宏覆盖和城区微覆盖场景,是提高系统容量的主要目标。通过在水平和垂直维度上进行天线波束成形,大规模 MIMO 技术可以同时为处于建筑物内不同楼层以及建筑物外的用户提供服务,成为潜在地解决高层建筑覆盖问题的技术方案。

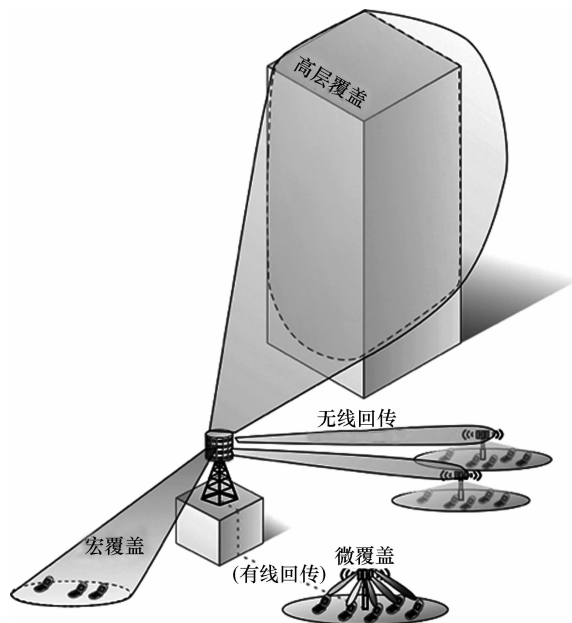


图8 大规模 MIMO 应用场景示例

宏、微基站之间的无线回传也是大规模 MIMO 的潜在应用场景之一。在实际网络部署过程中,提供回传链路是影响网络建设成本的重要因素。伴随着大规模 MIMO 的广泛部署,具有高增益的波束成形方案的成本大大减少,为解决无线回传的可行性方法提供了一种新的思路 and 方案。

3.4 大规模 MIMO 的技术挑战

大规模 MIMO 技术是目前移动通信领域容量潜力最高的技术之一。但是从系统设计及工程实现的角度,仍然有众多关键技术问题需要有效地解决。

有源集成化天线:由于波束成形的需要,天线设计需要将有源电路与天线阵子进行结合,构成高度集成化的有源天线系统。对天线系统的结构、尺寸、重量、散热、级联及维护等都提出了挑战。特别是在天线共享方面,大规模 MIMO 无法与 2G、3G 以及现有系统共享天线。在天线资源



日益紧张的环境下,这种天线形态能否成功地实现大规模的商用化,存在一定的风险。

信道信息精确度及反馈开销:对于大规模 MIMO,每个天线都需要较高精度的信道状态信息。信道估计的精确度、时延以及庞大的反馈开销及处理将成为影响能否获得较好增益的关键因素。信道的变化速度、覆盖环境的复杂度、蜂窝信号的干扰强度以及反馈信息的速度,也都是影响大规模 MIMO 的效果和成功部署的关键。

控制广播信道设计及算法稳定性:尽管对大规模 MIMO 已经存在大量研究,但其与控制广播信道的联合设计以及各算法在实际复杂环境中的稳定性,还不具有足够的实际经验。因此,一定时间的规模部署磨合期将不可避免。

3.5 大规模 MIMO 的标准化进展

ITU 于 2012 年启动针对 5G 系统的各项研究工作,目前 5G 系统的需求、愿景、关键技术、技术发展趋势以及频谱等方面均仍处在研究阶段。工业和信息化部、国家发展和改革委员会于 2013 年 2 月组织国内运营商及相关设备制造厂商、科研单位成立了中国 IMT-2020(5G)推进组,并在 2013 年 12 月正式启动大规模 MIMO 关键技术的研究工作。

大规模 MIMO 技术作为 5G 系统的重要备选技术,与其相关的技术演进和标准化研究工作也已在 3GPP 标准化组织中分阶段展开。

- 阶段 1,主要工作是三维信道模型标准化^[20]。3GPP 标准化组织于 2013 年 9 月启动了对三维信道模型的研究工作,为后续的 3D-MIMO 和大规模 MIMO 的研究工作做准备,有望于 2014 年 9 月完成。
- 在阶段 2,主要工作是 3D-MIMO 的标准化。目前,3GPP 标准化组织已经开始准备关于 3D-MIMO 的研究立项,研究内容包括更多的天线端口数(如 16、32、64 个)、3D-MIMO 的设计方案以及性能评估,并希望尽快启动相关研究工作。从目前来看,3D-MIMO 技术有望在 3GPP R13 版本中引入。
- 阶段 3,将对大规模 MIMO 进行标准化。大规模 MIMO 将通过在阶段 2 的基础上进一步增加基站侧天线数目(如 128、256 根等),实现 10 个或更多用户的多用户传输。大规模 MIMO 标准化工作的具体时间取决于 3GPP 标准化组织对 5G 系统标准化的整体时间安排,预计在 R14/R15 版本展开研究,并在 2020 年之前完成相关标准化工作。

参考文献

- 1 Foschini G J, Gans M J. On limits wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Communication*, 1998, 6(3):331~335
- 2 Telatar I E. Capacity of multiple antenna Gaussian channels. *European Transactions on Telecommunication*, 1999, 10(6): 585~595
- 3 Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas. *Bell Labs Technical Journal*, 1996(1)
- 4 Foschini G J, Golden G D, Valenzuela R A, *et al.* Simplified processing for high spectral efficiency wireless communication employing multi-element arrays. *IEEE Journal on Selected Areas Communication*, 1999, 17(11):1841~1852
- 5 Wolniansky P W, Foschini G J, Golden G D, *et al.* V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel. *Proceedings of IEEE Conference of the International Symposium on Signals, Systems and Electronics*, Pisa, Italy, 1998
- 6 3GPP TS 36.211. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Physical Channels and Modulation (Release 10), 2010
- 7 3GPP R1-103376. Antenna Configurations for Practical Deployments, TSG-RAN WG1 #61, 2010
- 8 中华人民共和国工业和信息化部. TD-LTE 数字蜂窝移动通信网智能天线第 1 部分:天线(征求意见稿),2014
- 9 中国电信集团公司. 中国电信 LTE 覆盖增强天线设备技术要求 and 测试要求,2013
- 10 Marzetta T. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(11): 3590~3600
- 11 Larsson E G, Marzetta T, Rusek F, *et al.* Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 2013,30(1): 40~60
- 12 Ngo H Q, Larsson E G, Marzetta T. The multicell multiuser MIMO uplink with very large antenna arrays and a finite-dimensional channel. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(6): 2350~2361
- 13 Huh H, Caire G, Papadopoulos H C, *et al.* Achieving “massive MIMO” spectral efficiency with a not-so-large number of antennas. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012,11(9):3226~3239
- 14 Nam J, Ahn J Y, Adhikary A, *et al.* Joint spatial division and multiplexing: realizing massive MIMO gains with limited channel state information. *Proceedings of 46th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, Chongqing, China,2012
- 15 Hoydis J, Hosseini K, Brink S T, *et al.* Making smart use of excess antennas: massive MIMO, small cells, and TDD. *Bell Labs Technical Journal*, 2013(2)

16 Krishnan N, Yates R, Mandayam N. Uplink linear receivers for multi-cell multiuser MIMO with pilot contamination: large system analysis. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014(8)

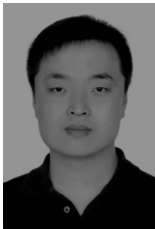
17 Shepard C, Yu H, Anand N, et al. Argos: practical many-antenna base stations. Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Istanbul, Turkey, 2012

18 Dahlman S, Parkvall, Skold J. 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, 2nd Edition. Academic Press, 2013

19 Zheng L, Tse D N C. Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple-antenna channels. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(5): 1073~1096

20 3GPP TR 36.873, 3D-Channel Model for LTE, 2014

的突破，成为 1949 年来第一位来自中国大陆的贝尔实验室院士。2005 年，获全美亚裔最佳工程师奖。国际电机电子工程师学会会士，2010 年全职回国并入选中央组织部第四批千人计划，目前拥有 42 项美国国家专利及 66 项欧洲专利。



谢伟良，男，博士，中国电信股份有限公司技术创新中心高级工程师，长期从事 3G/4G 移动通信技术研究、标准与测试工作。

[作者简介]



毕奇，男，博士，中国电信股份有限公司技术创新中心主任，中国电信股份有限公司北京研究院总工程师，2000 年及 2002 年两次获贝尔实验室总裁金质奖，所领导的团队于 2003 年获贝尔实验室基础科学研究部最佳创新团队奖。2002 年获得历史性



陈鹏，男，博士，中国电信股份有限公司技术创新中心高级工程师，长期从事移动通信关键技术及标准研究工作。

(收稿日期：2014-08-01)



· 简讯 ·

2014 年 8 月通信业主要指标完成情况(一)

指标名称	单位	本年本月止累计到达	比上年同期累计	本月
电信业务收入(按可比口径)	亿元	7 924.1	6.2%	998.7
电信固定资产投资完成额	亿元	1 841.8	6.5%	237.0
固定本地电话通话时长合计	万分钟	17 661 327.0	-13.8%	2 199 672.1
区间电话通话时长	万分钟	1 768 264.7	-17.6%	224 132.7
区内电话及拨号上网通话时长	万分钟	15 893 062.3	-13.3%	1 975 539.4
固定长途电话通话时长合计	万分钟	3 563 019.3	-10.1%	440 458.3
国内长途电话通话时长	万分钟	3 495 426.1	-9.7%	432 542.8
国际电话通话时长	万分钟	38 755.1	-31.8%	4 375.5
港澳台电话通话时长	万分钟	28 838.2	-21.2%	3 540.0
移动电话通话时长合计(含本地)	万分钟	195 339 680.0	2.1%	24 593 626.3
移动电话国内长途通话时长	万分钟	45 397 337.4	3.3%	5 730 309.3
移动电话国际电话通话时长	万分钟	86 734.8	1.6%	11 366.3
移动电话港澳台电话通话时长	万分钟	61 781.5	-4.7%	7 980.4
移动短信业务量	万条	50 615 764.2	-17.9%	6 249 767.7
移动互联网接入流量	万吉比特	121 343.6	56.2%	17 713.3

注：(1)电信业务收入增长率为营改增后调整上年同期的收入同比增长；(2)固定长途电话通话时长和移动电话通话时长均包含相应的 IP 电话通话时长；(3)通话时长各项指标均为去话通话时长。

(来源：工业和信息化部运行监测协调局)