

4.5G Massive MIMO 关键技术研究

Research on the Key Technology of 4.5G Massive MIMO

韩玉楠,李福昌,张 涛,张香云(中国联通网络技术研究院,北京 100048)

Han Yunan, Li Fuchang, Zhang Tao, Zhang Xiangyun (China Unicom Network Technology Research Institute, Beijing 100048, China)

摘 要:

以4G业务发展的需求引入对Massive MIMO技术探讨,主要介绍Massive MIMO概念,和性能提升的理论分析,并对Massive MIMO相关技术的标准进展进行阐述,针对Massive MIMO的阵列天线技术和测量、预编码技术进行了详细研究,最后结合4.5G Massive MIMO产品和性能探讨应用部署场景。

关键词:

4.5G; Massive MIMO; 阵列天线; 预编码

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2017.06.001

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1007-3043(2017)06-0001-01

Abstract:

Due to the rapid development of 4G traffic, it introduces the Massive MIMO technology for improving the 4G system capacity. It describes the Massive MIMO concept, analyzes the performance improvement theory, and then elaborates the standard of related technology of Massive MIMO. It studies the array antenna technology and measurement, precoding technology in detail. Finally, based on 4.5G Massive MIMO products and the performance, it discusses the deployment scene of 4.5G Massive MIMO.

Keywords:

4.5G; Massive MIMO; Array antenna; Precoding

引用格式: 韩玉楠,李福昌,张涛,等. 4.5G Massive MIMO 关键技术研究[J]. 邮电设计技术, 2017(6): 1-5.

0 引言

随着4G网络的全面部署和推广,2016年初,我国4G用户已超越3G用户,更于2016年8月4G用户占移动用户比例超越50%。4G用户飞速发展,给4G网络带来十分严重的容量瓶颈。

随着4G广泛部署,流畅移动视频业务成为可能,并迅速成为移动数据业务的中坚力量。此外,基于移动网络的手游也迅速爆发,2016年手游玩家已达到4.65亿人,手游流量占比迅速提升。业务导向、套餐优

化、网络升级推动移动互联网流量爆发式增长,从2015年10月到2016年10月,人均移动互联网流量增长高达103%。

对于热点区域流量爆发式增长,运营商积极通过更多频谱部署载波聚合,结合微站、室分等部署解决热点容量问题。但在以校园为主的热点场景,由于流量密集,现有频谱资源已无法满足容量需求,微站在站址协调及施工、设备成本、干扰管控方面依然存在诸多问题,室分造价及物业协调、施工也受到诸多限制,因此需要从空间维度考虑,利用空间维度增益,提升频谱效率,提升热点场景业务容量。

Massive MIMO是一种利用空间分集和复用增益,

收稿日期: 2017-05-08

实现更多波束更高容量的5G无线技术。但对 Massive MIMO 技术来说,其不依赖于空口的编码方式,因此 Massive MIMO 也同样适用于 LTE 网络。当前,由于网络容量压力日趋增大,各设备公司均将 Massive MIMO 技术进行了 4G 化应用研究,并相继推出可商用部署产品。

1 Massive MIMO 关键技术

1.1 标准进展

LTE 系统物理层的基本构架建立在 OFDM+MIMO 的基础之上,MIMO 技术对于提高数据传输的峰值速率与可靠性、扩展覆盖、抑制干扰、增加系统容量、提升系统吞吐量有着重要作用。面对速率与频谱效率需求的不断提升,对 MIMO 技术的增强与优化始终是 LTE 系统演进的一个重要方向。

LTE R8 基于发射分集、闭环/开环空间复用、波束赋形与多用户 MIMO 这几种 MIMO 技术定义了多种下行传输模式以及相应的反馈机制与控制信令。LTE R8 中的下行 MIMO 技术主要是针对单用户传输进行优化的,其 MU-MIMO 方案在预编码方式、预编码频域颗粒度、CSI 反馈精度及控制信令设计方面存在的缺陷在很大程度上限制了 MU-MIMO 传输与调度的灵活性,不能充分发挥 MU-MIMO 技术的优势。

LTE R9 中引入的双流波束赋形技术从参考符号设计及传输与反馈机制角度对 MU-MIMO 传输的灵活性及 MU-MIMO 功能进行了改进:采用了基于专用导频的传输方式,可以支持灵活的预编码/波束赋形技术;采用了统一的 SU/MU-MIMO 传输模式,可以支持 SU/MU-MIMO 的动态切换;采用了高阶 MU-MIMO 技术;支持基于码本与基于信道互易性的反馈方式,更好地体现了对 TDD 的优化。

LTE R10 的下行 MIMO 技术沿着双流波束赋形方案的设计思路进行了进一步的扩展:通过引入 8 端口导频以及多颗粒度双级码本结构提高了 CSI 测量与反馈精度;通过导频的测量与解调功能的分离有效地控制了导频开销;通过灵活的导频配置机制为多小区联合处理等技术的应用创造了条件;基于新定义的导频端口以及码本,能够支持最多 8 层的 SU-MIMO 传输。R10 的上行链路中也开始引入空间复用技术,能够支持最多 4 层的 SU-MIMO。

历经 3 个版本的演进,LTE 中的 MIMO 技术日渐完善,其 SU/MU-MIMO 方案都已经得到了较为充分的优

化,MIMO 方案研究与标准化过程中制定的导频、测量与反馈机制也已经是 CoMP 等技术的引入提供了良好的基础。

LTE R13 开始对 FD-MIMO(Full Dimension Multi-Input-Multi-Output)进行研究,3GPP 讨论了端口数目增至 64 的大规模 2D 有源天线阵列(2D Antenna Array)下的关键技术,FD-MIMO 采用大规模 2D 有源天线阵列,可以利用空间隔离度为极大数目的移动终端同时同频提供服务从而大幅提升系统容量,此外,2D 天线面板可以充分利用竖直维的空间自由度实现 3D 波束赋形使得系统覆盖大幅提升。LTE R14 继续 eFD-MIMO 的研究,对预编码的 CSI-RS 和非预编码的 CSI-RS 进行了扩展,对于 DMRS 和 Hybrid CSI-RS 仍在进一步讨论,由于 FD-MIMO 技术对系统的覆盖和容量均有可观的增益,且随着有源天线技术的发展使得大规模天线阵列的实现成为可能,其发展前景被一致看好。

1.2 阵列天线

Massive MIMO 相比于传统 MIMO 能够有效提升性能的重要关键技术就是大规模阵列天线。其主要原理是基于相控阵天线,相控阵天线通过控制阵列天线中辐射单元的馈电相位来改变方向图形状,其突出优点是增益高,能迅速准确地控制波束方向,波束无惯性,并且能在覆盖范围内同时跟踪多个用户。

Massive MIMO 基站端放置大规模天线阵列,在理论上,当 M 趋于无穷时,空间分开的不同用户的矢量信道将趋于正交,这样同小区内用户间干扰被消除,简单的 MRC 算法即可达到最优,同时,由多天线所形成的极窄波束的分辨率将高于产生小尺度瑞利衰落的多径的尺度,因而小尺度衰落几乎被消除。

图 1 给出了 8 天线阵子和 16 天线阵子方向图。

由图 1 可看出,对单一波束,参与辐射阵子越多,越能获得更窄波束和更高的波束幅度增益。但是由

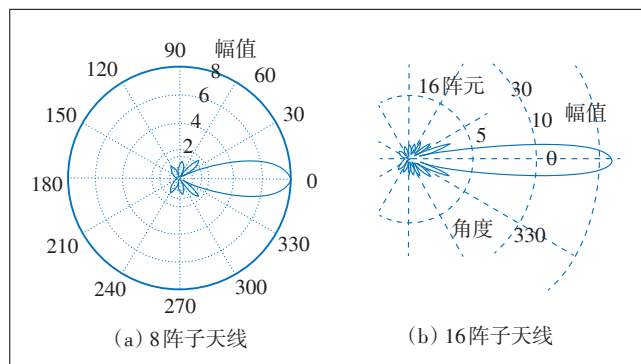


图 1 8 天线阵子和 16 天线阵子方向图

于阵列天线尺寸与天线阵子的数目正相关,更多的天线阵子导致天线尺寸过大,设备设计和应用难度过高,因此需要折中选择,现有 Massive MIMO 天线阵子大多从几十到一百多,未来 5G 高频段或可实现 200 以上阵子的阵列天线。

1.3 测量及预编码

实现 Massive MIMO 最重要的一项关键技术就是信道测量及预编码,能够有效获取信道信息,并进行准确的预编码,才能发挥波束赋形的效果。当前预编码主要分为线性预编码和非线性预编码。

线性预编码是依靠闭环方式预编码技术,其依赖于信道状态信息(CSI——Channel State Information)测量,根据最优化算法对传输数据进行预编码操作,提升系统的频谱效率。线性预编码按照预编码矩阵的获得位置划分为两大类预编码方式:非基于码本的预编码和基于码本的预编码操作(见图2和图3)。

非基于码本的预编码通过终端的探测参考信号(SRS)进行信道信息测量并进行信道估计和量化,根据信道信息状况实时进行预编码矩阵计算,生成预编码后,对数据进行预编码操作并在天线映射和发送,非码本的预编码方式要求使用专用参考信号,即数据符号和导频符号一起进行预编码操作,这样接收端只需要通过信道估计就可以获得预编码之后的等效信道,从而方便进行数据解调。由于TDD制式具有上下行信道互易性,通常现网TDD制式使用非基于码本的方式进行预编码。而FDD制式的上下行在不同频段,通过上行测量的信道信息与下行信道状况有一定差异,因此通常FDD使用基于码本的方式。

基于码本的预编码信道信息测量和量化由接收端获得,接收端根据预测的信道状态信息从预先编制

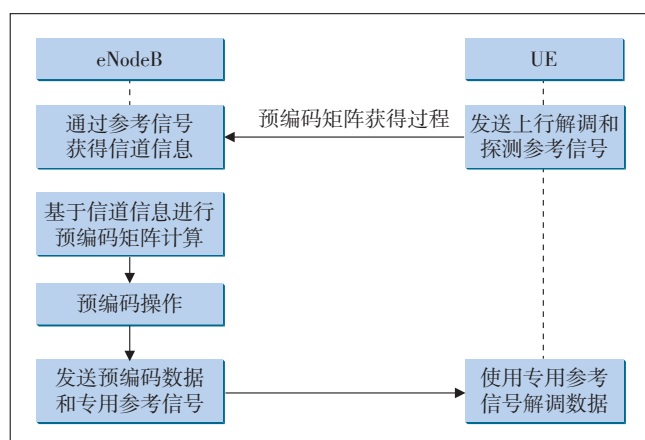


图2 非基于码本的预编码过程

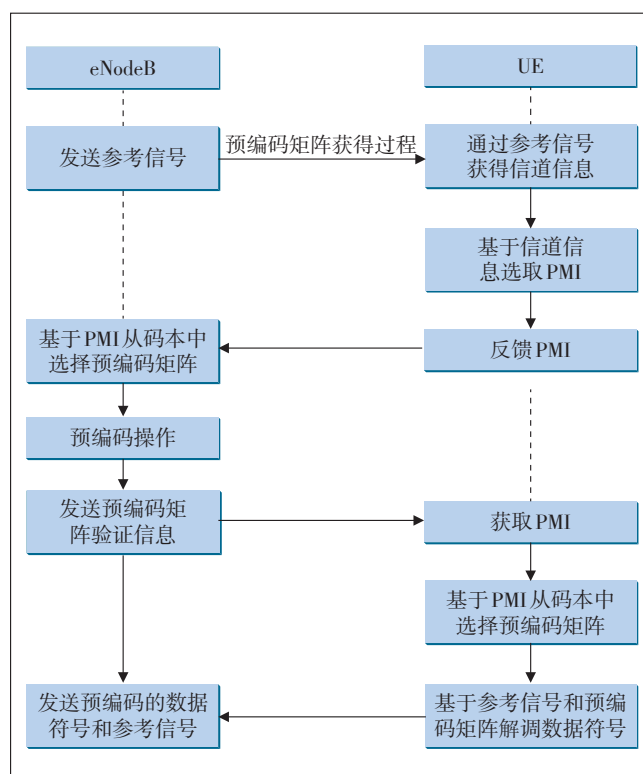


图3 基于码本的预编码过程

好的预编码本中选择,并将所选取的预编码矩阵序号发送给基站,由基站按照对应的预编码矩阵进行预编码。由于采用基于码本的预编码方式通过发射矩阵序号代替信道矩阵,从而节省了信道资源。其缺点是由于码本的数量有限,从而造成预编码性能受到很大限制。

基于码本的预编码存在的主要问题:一是如何构建码本,二是如何从码本中选择一个理想的预编码矩阵。码本是基于信道测量而设计最优预编码矩阵的一个量化,码本的大小和各码字之间的距离影响着预编码的性能。预编码矩阵码本的构建方式也有多种,如基于DFT的码本、基于天线选择的码本、RBF(Random Beamforming)、基于TxAA(Transmit Adaptive Array)模式的码本等。

在非线性预编码中,DPC(Dirty Paper Coding)可以达到最优速率,但是由于实现复杂度非常高,难以在商用系统中普遍应用,不适用于Massive MIMO系统。

因此现有商用系统多推荐应用线性预编码,常见的线性预编码有MF(Match Filter)、ZF(Zero Forcing)、RZF(Regularized Zero Forcing,采用MMSE准则设计时也称为MMSE预编码)以及BD预编码等。针对各种预编码性能,相关文献已有系统性评估,MMSE于ZF性

能优于MF性能,MMSE与ZF预编码性能接近DPC。综合实现复杂度和性能优势,各公司在商用系统多考虑采用ZF预编码。

ZF算法是MIMO系统中应用较为广泛的一种预编码方式,其原理为构造一个信道矩阵的逆矩阵,并在接收端左乘 H 的逆矩阵以达到消除信道影响的目的,而接收端的信号可以改写成列式相加:

$$y = h_1 x_1 + h_2 x_2 + \dots + h_m x_m + n$$

式中 h 为信道矩阵的列。检测出 x ,需要消除其他天线的影响,通过左乘矢量 w_i 来实现,需要的 w_i 条件为:

$$w_i h_j = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases}$$

将 w_i 作为行矢量构成预编码矩阵, $W_{ZF} \cdot H = I$,可得:

$$W_{ZF} = (H^H H)^{-1} H^H$$

发送信号估值为:

$$\hat{x} = (H^H H)^{-1} H^H (Hx + n)$$

两者协方差为:

$$C_{ZF} = E\{(\hat{x} - x)(\hat{x} - x)^H\} = \sigma^2 (H^H H)^{-1}$$

可以看到,ZF可以在接收到的信号中完全除去本小区内用户之间信道干扰。但是也存在2点不足:发送信号中的数据流数目需要和接收用户数保持一致;噪声过大将导致信噪比急剧恶化从而影响总体性能。

2 4.5G Massive MIMO应用部署

2.1 4.5G Massive MIMO 产品分析

4.5G Massive MIMO产品,空口基于LTE,产品形态上,既存在的RRU+天线的一体化设备,也存在BBU+RRU+天线的一体化设备,其切分面不同主要考虑小区间协同、CPRI接口速率限制等因素。当前主流产品主要为RRU+天线即有源天线的模式。其天线阵列多采用128阵子的排列方式。其采用水平8天线,垂直8天线,结合交叉双极化的 $8 \times 8 \times 2$ 方式。

当前TDD产品多采用64通道数,理论可实现64数据流发送与接收,但是空口受限于波束宽度、波束间干扰、信道矩阵的量化和预编码设计,当前可实现空口16流的数据传输,相比于传统2流系统提升频谱效率近8倍。

TDD产品采用如图2所示的非基于码本的预编码

方式,依赖于上行SRS进行信道测量和估计,多采用ZF预编码算法。

当前FDD产品设计为32通道,理论上可实现32数据流发送与接收,当前可实现空口8~16流的数据传输,相比于传统2流系统提升频谱效率4~8倍。由于更多天线端口发送需要额外的参考信号开销,实际系统频谱效率提升会略低于4~8倍。

FDD系统由于无法利用上行SRS完全互易实现信道测量,因此,基于TM9模式采用CSI-RS测量和DM-RS的解调方式。在系统实现上,各公司根据场景变化会要求不同信道信息反馈,基站侧基于私有算法进行预编码矩阵设计,然后进行预编码过程进行数据发送和解调。FDD信道测量及预编码过程如图4所示。

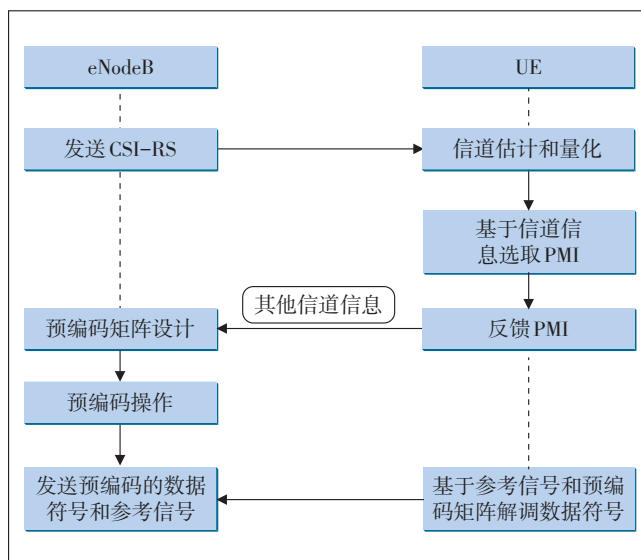


图4 FDD系统信道测量及预编码过程

但是由于当前支持TM9终端市场普及率并不高,针对现有仅支持TM3、TM4的终端,FDD Massive MIMO采用类似劈裂天线概念,利用软劈裂算法进行空分复用。

2.2 4.5G Massive MIMO 性能

基于TDD的Massive MIMO各主设备公司如华为、中兴、爱立信均有完善产品和解决方案,当前可利用MU-MIMO实现多用户空间复用,达到单小区20 MHz单载波近650 Mbit/s吞吐量,结合CA部署,单小区吞吐量可提升至2 Gbit/s,能够有效提升密集热点业务场景的容量。同时由于波束赋形的功率有效性,可提升小区边缘用户速率10倍以上。

基于FDD的Massive MIMO当前已完成系统内外场功能评估和部分性能测试,具体结果如下。

a) FDD Massive MIMO 小区基本功能,单用户 MIMO,上、下行 FTP、网页浏览、视频等基本业务已完成验证,可进行商用部署和商用用户接入。

b) 对于水平分散多 UE 小区峰值容量测试,利用 TM9 终端已获得 20 MHz 单小区 4 用户 8 流达到小区吞吐量 500 Mbit/s 的效果。

c) 对 Massive MIMO 小区的近、中、远点波束赋形效果进行验证测试,获得平均 6~8 dB 增益(见表 1)。

表 1 波束赋形增益测试效果

测试点	波束赋形	RSSI/dB	波束赋形增益/dB
近点	无	-29.8	8.1
	有	-21.7	
中点	无	-62.4	6.8
	有	-55.6	
远点	无	-75.7	7.3
	有	-68.4	

FDD Massive MIMO 技术受限于信道测量,需要更加复杂的信道估计和预编码,由于各场景无线环境差异较大,需要针对信道估计和预编码算法进行不断完善和优化。

后续 FDD Massive MIMO 将拓展垂直维度赋形增益,提升单小区容量,并结合载波聚合、下行 256QAM、上行 64QAM 全面提升热点区域容量和业务体验。

2.3 Massive MIMO 部署

当前随着 4G 用户普及率快速提升,4G 网络在部分场景逐渐接近拥塞,如各地高校宿舍区已开启全部可用频段载波聚合,但是网络依然出现拥塞。面对此类场景,利用具有较高频谱效率 Massive MIMO 的部署已是必然的选择。

此外,针对高层商务楼宇,利用传统室分建设周期长,容量低,物业协调难度极高,通过 Massive MIMO 的垂直维度波束赋形增益,可有效进行低、中、高层的全面覆盖。

由于 Massive MIMO 也是 5G 的关键技术之一,采用 4.5G 的 Massive MIMO 组网,后续可同频段平滑演进,因此随着业务量提升,Massive MIMO 可逐步在现网热点区域部署,提升用户业务感知。

3 小结

本文以 4G 业务发展引入对 Massive MIMO 技术需求,介绍了 Massive MIMO 的概念,容量提升的理论分析,并针对标准进展、阵列天线、测量和预编码等关键

技术进行详细阐述和分析,最后分析了现有 4.5G Massive MIMO 设备情况,并针对 Massive MIMO 性能和试验结果进行探讨,给出了 4.5G Massive MIMO 应用部署的场景。

参考文献:

- [1] PRABHU H, RODRIGUES J, EDFORS O, et al. Approximate matrix inverse computations for very-large MIMO and applications to linear pre-coding systems[C]// Wireless Communications and NETWORKING Conference, IEEE, 2013: 2710-2715.
- [2] NOH H, KIM Y, LEE J, et al. Codebook Design of Generalized Space Shift Keying for FDD Massive MIMO Systems in Spatially Correlated Channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(2): 513-523.
- [3] SHIRANI-MEHR H, SAJADIEH M, LI Q. Practical downlink transmission schemes for future LTE systems with many base-station antennas[C]// Global Communications Conference, IEEE, 2013: 4141-4145.
- [4] SHIRANI-MEHR H, SAJADIEH M, LI Q. Practical downlink transmission schemes for future LTE systems with many base-station antennas[C]// Global Communications Conference, IEEE, 2013: 4141-4145.
- [5] 武龙. 随机波束赋形在 MIMO 中的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [6] COSTA M H M. Writing on dirty paper (Corresp.)[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, 29(3): 439-441.
- [7] HOYDIS J, HOEK C, WILD T, et al. Channel measurements for large antenna arrays[C]// International Symposium on Wireless Communication Systems. IEEE, 2012: 811-815.
- [8] 马珺, 马林, 俞凯, 等. 大规模阵列天线方向图成形预编码性能仿真[J]. 电视技术, 2015, 39(1): 68-71.
- [9] JOHND. KRAUS, RONALD J. MARHEFKA. 天线: FOR ALL APPLICATIONS. 上册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [10] 刘庆刚, 张光生. 阵列天线仿真研究[J]. 通信对抗, 2012(2): 49-51.
- [11] 陈文洪, 高秋彬, 陈润华, 等. 基于 CSI-RS 赋形的大规模天线阵列预编码与反馈方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(1): 49-60.
- [12] SHARIATI N, BJÖRNSON E, BENGTTSSON M, et al. Low-Complexity Polynomial Channel Estimation in Large-Scale MIMO With Arbitrary Statistics[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 815-830.

作者简介:

韩玉楠, 工程师, 硕士, 主要从事移动通信系统标准制定及新技术研究试验工作; 李福昌, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事移动通信系统新技术研究工作; 张涛, 高级工程师, 硕士, 主要从事移动通信系统新技术研究工作; 张香云, 工程师, 硕士, 主要从事移动通信系统新技术研究工作。