

面向5G新空口的Massive MIMO

Massive MIMO Technology Standard Progress and Development for 5G New Radio

技术标准进展及演进

陈丹丹¹, 梁 辉²(1. 北京邮电大学, 北京 100876; 2. 中国联通网络技术研究院, 北京 100048)

Chen Dandan¹, Liang Hui²(1. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 450007, China; 2. China Unicom Network Technology Research Institute, Beijing 100048, China)

摘 要:

5G的无线接入部分以新空口(NR——New Radio)标准为基础进行扩展,高效连接海量物联网、支持新型关键业务服务,达到低时延、高可靠、高安全性的新水平。作为5G NR关键性技术之一,Massive MIMO在基站端使用远超激活终端数的天线,实现3D波束成型,大幅提高频谱利用效率、网络容量和覆盖率。首先介绍Massive MIMO系统模型,其次总结3GPP Rel-15版本中Massive MIMO标准化研究内容,最后讨论Massive MIMO技术标准演进方向。

关键词:

5G; 新空口; Massive MIMO
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2018.11.003
中图分类号:TN929.5
文献标识码:A
文章编号:1007-3043(2018)11-0012-05

Abstract:

5G based on NR (New Radio) can be expanded, efficiently connect massive IoT, support new key business services, and achieve new levels of low latency, high reliability and high security. Massive MIMO, as one of 5G key technologies, can implement 3D beamforming and significantly improve spectrum utilization efficiency, network capacity and coverage with a large excess of service antennas in base stations over active terminals. Firstly it introduces the system model of Massive MIMO, then it summarizes the standardization content of Massive MIMO in 3GPP Rel-15 version, and finally the development direction of Massive MIMO technology standard is discussed.

Keywords:

5G; New Radio; Massive MIMO

引用格式:陈丹丹, 梁辉. 面向5G新空口的Massive MIMO技术标准进展及演进[J]. 邮电设计技术, 2018(11): 12-16.

0 引言

智能终端的迅速普及导致无线数据业务需求的爆炸式增长,从而使无线接入网络暴露出频谱资源短缺以及频谱效率亟待提升等严重问题。研究表明Massive MIMO系统在性能上取得重大突破,能显著提高通信容量、频谱效率、能量效率和吞吐率。5G新空口(NR——New Radio)中Massive MIMO具备了一些传统MIMO技术所无法比拟的物理特性和性能优势,

主要包括以下几个方面。

a) 高复用增益和分集增益。天线数目的增多,最直接的影响是为传播信道提供了更多的复用增益和分集增益,使得系统在数据速率和链路可靠性上拥有更好的性能。

b) 信道渐进正交性。随着基站天线数目的大幅增加,不同用户之间的信道向量将呈现出渐近正交特性,用户间的干扰可以被有效地消除。

c) 信道硬化。当基站天线数量很多时,信道的小尺度衰落效果被平均化,显著降低信号处理复杂度。

d) 高能量效率。相干合并可以实现非常高的阵

收稿日期:2018-10-20



列增益, 基站可以将能量聚焦到用户所在的空间方向上, 通过大量的天线阵列增益, 辐射功率可以降低一个数量级或更多。

e) 高空间分辨率。随着天线阵列规模趋于无限大, 基站侧形成的波束将变得非常细窄, 具有极高的方向选择性及波束赋形增益。

1 Massive MIMO 系统模型

Massive MIMO 利用三维(3D)信道中垂直和水平维度的空间分辨率, 发射细窄的指向性波束来区分不同空间分布的用户, 提高系统性能。3D Massive MIMO 系统的信道模型如图 1 所示。

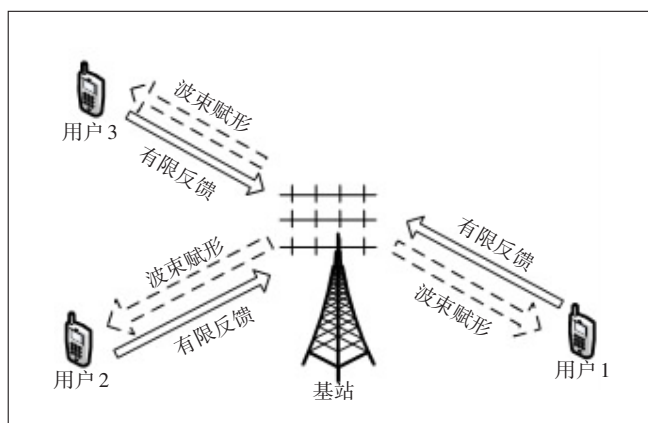


图 1 3D Massive MIMO 系统的信道模型示意图

基站侧配置了二维均匀面阵结构(2D URA)天线, 天线数目为 $N \times M$, 其中 N 为水平维度的天线振子数目, M 为垂直维度的天线振子数目; 系统中共 K 个用户, 每个用户均采用单天线结构配置。基站侧到第 k 个用户的信道响应矩阵如式(1)所示。

$$H_{3D} = \begin{bmatrix} h_k^{1,(1,1)} & h_k^{1,(1,2)} & \cdots & h_k^{1,(1,M)} \\ h_k^{1,(2,1)} & h_k^{1,(2,2)} & \cdots & h_k^{1,(2,M)} \\ \vdots & \vdots & h_k^{1,(n,m)} & \vdots \\ h_k^{1,(N,1)} & h_k^{1,(N,2)} & \cdots & h_k^{1,(N,M)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $h_k^{1,(n,m)}$ 表示基站侧第 n 个水平、第 m 个垂直发送天线到用户侧单天线的信道响应信息。3D 信道矩阵的每一行就代表水平维度的信道信息, 每一列就代表垂直维度的信道信息。

$[h_k^{1,(i,1)} \ h_k^{1,(i,2)} \ \cdots \ h_k^{1,(i,M)}]$, $(1 \leq i \leq N)$ 表示基站侧第 i 个水平天线阵列到用户侧单天线的信道信息, 可称为水平信道; $[h_k^{1,(1,j)} \ h_k^{1,(2,j)} \ \cdots \ h_k^{1,(N,j)}]$, $(1 \leq j \leq M)$ 表示基站侧第 j 个垂直天线阵列到用户侧单天线的信道信息, 可称为垂直信道。

2 Massive MIMO 技术标准化研究

Massive MIMO 技术标准化工作主要考虑多天线传输方案、信道反馈、波束管理与参考信号设计等部分。下面将针对这几方面的标准化工作分别介绍 Rel-15 中 Massive MIMO 标准化研究进展情况。

2.1 多天线传输方案

2.1.1 下行传输机制

在 LTE 中, 标准主要聚焦于闭环 MIMO 传输, 由于在 NR 中要考虑更高速度下的鲁棒性, 因此 NR 同时支持开环传输和闭环传输。LTE 中开环和闭环传输是分开设计的, 可以根据需求和客观条件多次转换。在 NR 中, 由于传输环境更加复杂, 这种转换可能跟不上环境的变化, 同时考虑到分开设计难以同时达到传输效率和鲁棒性要求, 因此在 NR 中, 3GPP 在同一个框架里设计 2 种传输方案, 同时系统传输还考虑半开环传输方案, 支持传输方案间的动态切换。

NR 中由于系统承载的数据较多, 带宽进一步加宽, 不同相干带宽上的信道特性区别较大, 因此提出了频率选择性预编码, 即在不同的带宽上采取不同的编码方式。为了比较清晰地分割带宽, 3GPP 提出了把调度的 PRB 分为若干个组 (PRG) 的思想, 在每个组内采取相同的预编码方式, 这种分组技术即 PRB 绑定。

PDSCH 的传输方案支持最多 8 个传输层, 天线端口为 1000~1011; 当只有 1 个码字时支持 1~4 层传输, 有 2 个码字时支持 5~8 层传输; 同时支持下行 DMRS 空间复用 (SU-MIMO/MU-MIMO), 至少对于 SU-MIMO 支持 8 个正交 DMRS 端口, 对于 MU-MIMO 支持 12 个正交 DMRS 端口。

2.1.2 上行传输机制

NR 中上行传输机制支持 4 层传输, 考虑到反馈开销和性能, 支持基于码本传输、基于非码本传输、多样性/差异性传输 3 种方案, 对于多样性传输方案, 可以考虑 DFT-S-OFDM、CDD、precoder cycling、天线端口切换、SFBC 和 STBC, 同时支持传输方案间的动态切换。

基于码本传输方案, NR 考虑支持频率选择性预编码, 频率选择性预编码可以更匹配信道, 使系统获得更好的性能增益。基于非码本的传输 UE 可以根据 DCI 中的宽带 SRI 字段确定其 PUSCH 预编码和传输等级。基于 CP-OFDM 和 DFT-S-OFDM 的传输都支持 PRB 绑定。基于 CP-OFDM 的传输, PRB 绑定支持基



于码本的传输和基于非码本的传输;对于基于DFT-S-OFDM的传输,PRB绑定大小是整个调度带宽。

2.2 信道反馈

如何准确地获取信道状态信息也是Massive MIMO中重要的一环。CSI可以使通信系统适应当前的信道条件,在多天系统为高可靠性、高速率的通信提供保障。用户设备根据基站发送的导频信息(CSI-RS)测量得出信道状态信息(CSI),然后反馈给基站。NR支持周期、半周期、非周期CSI上报,CSI-RS资源可以是周期性的、半周期的或非周期的。表1显示了CSI上报配置和CSI-RS资源配置的支持情况,以及如何为每个CSI-RS资源配置触发CSI报告。

表1 CSI上报的触发/激活

CSI-RS 配置	周期 CSI 上报	半周期 CSI 上报	非周期 CSI 上报
周期 CSI-RS	非动态触发/激活	对于在 PUCCH 上的上报, UE 接收触发命令;对于在 PUSCH 上的上报, UE 接收来自 DCI 的触发命令	由 DCI 触发
半周期 CSI-RS	不支持	对于在 PUCCH 上的上报, UE 接收触发命令;对于在 PUSCH 上的上报, UE 接收来自 DCI 的触发命令	由 DCI 触发
非周期 CSI-RS	不支持	不支持	由 DCI 触发

NR支持2种CSI反馈方式:Type I和Type II反馈。Type I反馈利用波束选择原理,其开销比Type II低。Type II反馈利用波束组合原理,其性能增益比Type I大,但是其反馈开销显著增加。2种类型反馈方案设计目的不同。SU-MIMO不需要极高分辨率的CSI反馈,因为SU-MIMO主要依赖于UE来抑制层间干扰。因此,在宽带和/或子带反馈中选择单个波束的方案(如在Rel-10到Rel-13双级码本设计中),或者每层使用单个宽带系数的方案就足够。另一方面,高分辨率CSI反馈对MU-MIMO操作非常有益,由于MU-MIMO在eNB处使用多天线从空间上抑制不同UE间的干扰,因此更高分辨率的CSI反馈能让eNB处的波束成形更加精确,从而显著改善MU-MIMO性能。

Type I反馈为基于码本的PMI反馈,并且PMI码本至少有2级,如 $W=W_1W_2$,其中 W_1 码本搜索的第1级波束是宽带的、长期的, W_2 码本搜索的第2级波束可以是子带的、短期的,同时递送每个子带的量化系数。

Type II反馈具有更高空间分辨率,支持以下3种方案。

方案1:基于线性组合码本的预编码反馈。图2给

出了双级码本的反馈方式 $W=W_1W_2$,其中 W_1 由一组从二维DFT波束中提取出的 L 个正交波束组成,并且 L 个波束的集合是由过采样的二维DFT波束组成, $L \in \{2,3,4\}$ (L 是可配置的),且波束选择是宽带的。 W_2 内 L 个波束为 W_1 内的常见波束组合。组合系数是子带上报的相位量化,波束幅度量化可以被配置为宽带或子带上报。

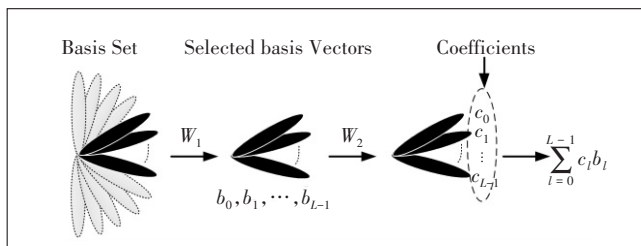


图2 基于线性组合码本的CSI反馈

方案2:协方差矩阵反馈。信道协方差矩阵的反馈是长期的、宽带的,且是一种显示反馈,协方差矩阵的量化/压缩版本是由UE上报的,其中,量化/压缩基于一组 M 个正交基向量,上报可以包括 M 个基向量的指示和一组系数。

方案3:混合CSI反馈。Type II中方案1或方案2 CSI码本可以协同LTE-Class-B-type-like CSI反馈使用,其中LTE-Class-B-type-like CSI反馈可以基于Type I或Type II CSI码本。

2.3 波束管理

NR支持的高频带中自由空间的路径损耗增加,信道或信号的传输依赖于更高的方向性链路。Massive MIMO中要求对准每个用户的波束更细、精确度更高。由于用户(UE)会发生移动、旋转和阻塞的情况,方向性的波束需要实时更新来保持收发点(TRP——Transmission and Reception Point)和UE间的链路质量。波束管理的过程包括上下行波束训练选择最优波束和波束恢复2个方面。

2.3.1 上下行波束训练

波束管理过程是为上下行的数据传输选择方向性波束对链路,首先需要选定用于上下行波束管理的参考信号(RS)。然后定义用于波束选择的流程,运用选定的参考信号进行波束训练获得用于传输的波束对链路(BPL——Beam Pair Link)。图3为上下行波束训练过程。

下行波束训练具体步骤如下:

P-1:该过程包含TRP端/UE端对波束的扫描,且



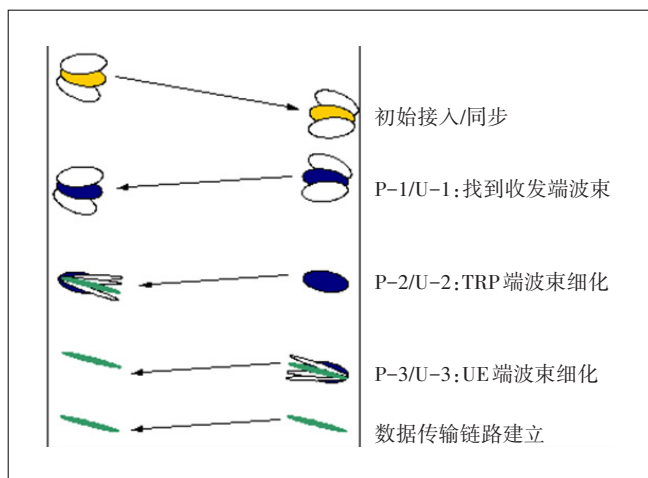


图3 上下行波束训练过程

产生收发端的粗波束。

P-2: 该过程是在 P-1 的基础上实现 TRP 端波束的细化, UE 使用选中的粗波束对 TRP 端的细波束进行测量, 找到 TRP 端的最佳发端波束。

P-3: 该过程是对 UE 波束的细化, 在波束测量的过程中 TRP 端使用 P-2 选好的细波束来对应细化 UE 端的收端波束。

上行波束训练具体步骤:

U-1: 该过程在不同的 UE 发端波束上进行 TRP 检测, 选择 UE 发端波束或 TRP 收端波束, 同时进行上行随机接入。

U-2: 该过程在不同的 TRP 收端波束上进行 TRP 检测, 改变或选择 TRP 收端波束, 实现 TRP 收端波束的细化。

U-3: 该过程在相同的 TRP 收端波束上进行 TRP 检测, 改变或选择 UE 发端波束, 实现 UE 发端波束的细化。

2.3.2 波束恢复

波束赋形 (BF——BeamForming) 初始接入过程叫做波束训练, 数据传输时的 BF 叫做波束追踪。当 UE 移动、旋转和波束阻塞时, 需要进行波束追踪。当数据传输过程中波束质量下降时, 需要进行波束恢复。波束恢复过程包括波束失败检测、新的候补波束确定、波束失败恢复请求传输以及 UE 接收波束失败恢复请求响应 4 个过程。

a) 波束失败检测: UE 监控用于检测波束失败的参考信号, 检测是否满足波束失败触发条件。若检测结果满足波束失败触发条件, 则宣布波束失败; 若检测结果未满足波束失败出发条件, 数据传输正常进

行。

b) 确定新的候补波束: 在数据传输过程中 UE 监控参考信号将用于寻找新的候补波束。新的候补波束可以在之前上报的波束组中进行选择, 也可以在原始波束附近进行搜索。如果在时间窗内找不到候补波束, 则需要启动小区选择和随机接入过程。

c) 波束失败恢复请求传输: 在检测到波束失败后, 用户向基站发送波束失败恢复请求信息告知基站。用于传输波束失败恢复请求的信道有 3 类: 基于竞争的 PRACH、基于非竞争的 PRACH 和 PUCCH。

d) 波束失败恢复请求响应: 接收到波束失败恢复请求信令后, 基站应对 UE 做出响应, 寻找新的候选波束或者重新建立传输链路。

2.4 参考信号

参考信号可以用于信道的估计和测量、eNB 端或 UE 端的相干解调和检测、小区搜索等, 其主要包括: CSI 参考信号 CSI-RS、用于用户传输数据接收解调的 DMRS、用于多用户调度的探测参考信号 SRS、相位追踪参考信号 PT-RS 和时频追踪参考信号 TRS。QCL 的空间参数则描述了在接收端观察到的 RS 天线端口的空间信道特性。

a) CSI-RS: NR 中 CSI-RS 至少有 3 个用途: 移动性过程、波束管理和 CSI 采集。CSI-RS 的设计至少支持 CDM-2、CDM-4 和 CDM-8。CDM 图样可以根据测量目标 (如 CSI 获得、波束管理、时频追踪) 和全功率利用率进行配置。NR 支持的 CSI-RS 传输周期为 {5, 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640} 个时隙。

b) DMRS: 解调参考信号 DM-RS 用于 PDSCH 解调, 并且与 PUSCH 或 PUCCH 共占 1 个资源区。其中 front-load DMRS 映射在 1 个或 2 个相邻的 OFDM 符号, additional DMRS 可以被配置在时隙的后部分。同时, DMRS 的设计需要考虑很多因素如 DMRS 序列、复用、调制和端口等。对于 NR 中的信道测量和干扰测量, CSI-RS 和 DMRS 可以在 1 个共享 RE 图样中传输。

c) SRS: SRS 是用于多用户调度的探测参考信号。SRS 是一个可选择的参考信号, 为 eNodeB 的资源调度提供参考。NR 支持 LTE SRS 序列, 通过使用 LTE SRS 序列生成式, NR 的 SRS 序列支持多达 272 个 PRB, 其中 272 个 PRB 对应于 NR 支持的最大带宽, 而且 NR SRS 序列的设计是基于 ZC 序列的。在传输方面, SRS 允许在一个 CC 内的部分频带之间切换。NR SRS 支持 4 PRB 多路复用的探测带宽, 为了提高 UE 小区边缘的



上行信道评估质量,在NR中考虑部分带宽的符号级或时隙级的跳频。

d) PT-RS: PT-RS的设计是基于相位追踪的,在高信噪比区域,高MCS需要PT-RS。在频域内,分布式PT-RS是PT-RS结构的默认设置。PTRS结构支持由一个UE接收的多路正交复用的PT-RS和数据传输,并且支持PTRS端口与DMRS端口之间关联。

e) TRS: TRS候选参考信号包括通用控制资源集或公共控制搜索空间的RS解调器、CSI-RS、专用RS、基于PDCH的DMRS、MRS、PT-RS和PSS/SSS。TRS设计的目的是根据不同的参数设置对性能进行评估,以满足性能要求。TRS的设计包含4种跟踪功能:良好的时间跟踪、频率跟踪、路径延迟传播和多普勒传播。TRS是由UE特定管理的,NR支持用于多TRP传输的TRS,如果UE支持多任务/多面板部署,则可以配置多个TRS。

f) QCL: NR中QCL的空间参数描述了在接收端观察到的RS天线端口的空间信道特性,如果可以从一个天线端口上传输符号的信道中推断出另一个天线端口上传输符号的信道属性,那么2个天线端口是准共定位的。QCL支持的功能有波束管理、频率/时间偏移估计、RRM管理等。对于QCL,NR支持每个PDSCH至少有1个或2个DMRS天线端口组,同时NR支持QCL在传输载波和带宽方面的DL假设。

3 Massive MIMO技术标准演进方向

3GPP Rel-15版本基本完成5G NR中对Massive MIMO要求的内容,下一步Rel-16将对Rel-15版本进行完善和增强,旨在提高系统性能、降低开销和时延。

尽管Rel-15中指定的Type II CSI优于Rel-14 LTE的增强CSI,但与理想的CSI相比,仍然存在一些重要但可消除的性能差距,特别是对于多用户MIMO,可增强空间很大,因此Rel-16需要研究Type II CSI反馈的性能扩展,而且Type II CSI反馈开销巨大,高达500 bit,对系统来说是一个巨大负担,所以还需考虑性能和开销之间的平衡。

Rel-15 NR MIMO暂时支持multi-TRP/panel操作,但支持的特性仅限于标准透明的传输操作和少量TRPs/panel。下一步multi-TRP/panel在传输方面需要提高可靠性和鲁棒性,研究如何增强下行链路控制信令、上行控制信令和参考信号,支持非相干联合传输的分集方案和两级DCI控制,同时考虑控制信道的

multi-TRP/panel传输。

虽然多波束操作规范在Rel-15(对超过6 GHz频段的操作)中已经做了很多说明,但是波束失败恢复和DL/UL波束选择方案仍可以提高鲁棒性,降低开销和延迟。多波束操作方面的增强内容(主要针对FR2频段)包括:增强在Rel-15中指定的UL和/或DL传输波束选择,以减少延迟和开销;研究基于multi-panel操作的UL发射波束选择,促进特定面板的波束选择;支持更先进的波束分组方案,实现毫米波高阶传输;基于Rel-15标准为SCell指定一个波束失效恢复流程;说明L1-RSRQ或L1-SINR的测量和上报。

4 结束语

本文结合5G NR Massive MIMO技术特点,总结了3GPP中Massive MIMO研究内容及进展,并分析了下一步标准演进方向。虽然Massive MIMO技术仍面临许多理论和实现问题的挑战,如为实现高速率数据传输,Massive MIMO技术对硬件复杂度的要求更高,消耗的功率更大,以及导频污染等问题,但是随着相关研究的持续深入,这些问题都能找到解决方案,推动Massive MIMO技术走向实用。

参考文献:

- [1] 韩潇,邱佳慧,范斌,等. Massive MIMO技术标准进展及演进方向[J]. 邮电设计技术,2017(3):1007-1043.
- [2] 张中山,王兴,张成勇,等. 大规模MIMO关键技术及应用[J]. 中国科学:信息科学,2015(9):1095-1110.
- [3] 戚晨皓,黄永明,金石. 大规模MIMO系统研究进展[J]. 数据采集与处理,2015(3):544-551.
- [4] HUH H, CAIRE G, PAPADOPOULOS H C, et al. Achieving "Massive MIMO" Spectral Efficiency with a Not-so-Large Number of Antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(9):3226-3239.
- [5] LARSSON E G, EDFORS O, TUFVESSON F, et al. Massive MIMO for next generation wireless Systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2013(2):186-195.

作者简介:

陈丹丹,硕士,主要从事5G标准化和物理层关键技术的研究工作;梁辉,毕业于北京邮电大学,工程师,硕士,主要研究方向为5G、无线网络虚拟化等。

