

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.09.001

引用格式:赵昆,蔡振浩.波束成形在 TD-LTE-A 系统中的性能优化[J].电讯技术,2014,54(9):1177-1180.[ZHAO Kun,CAI Zhen-hao.Performance Optimization of Beam Forming in TD-LTE-A Systems[J].Telecommunication Engineering,2014,54(9):1177-1180.]

波束成形在 TD-LTE-A 系统中的性能优化*

赵 昆**,蔡振浩

(上海贝尔股份有限公司,上海 201206)

摘 要:TD-LTE 系统中的波束成形(Beam Forming)会受到收、发天线不对称性的影响。TD-LTE-Advanced(TD-LTE-A)系统中使用上行多天线发送可以解决天线不对称性的问题,因此需要对其分析以优化 Beam Forming 的性能。通过对上行多天线的信道状态信息(CSI)做特征值(SVD)分解,指出了 Beam Forming 对下行信噪比(SNR)的改善。针对 Beam Forming 模式下 SNR 和链路质量指示(CQI)的差异,提出了一种优化链路自适应的方法。数值仿真验证了优化后的 TD-LTE-A 相比 TD-LTE 的 Beam Forming 吞吐率最大提高了 24%,其结论对商用 TD-LTE 网升级到 TD-LTE-A 具有显著价值。

关键词:多输入多输出;TD-LTE-A 系统;波束成形;链路质量指示;链路自适应;性能优化

中图分类号:TN929 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)09-1177-04

Performance Optimization of Beam Forming in TD-LTE-A Systems

ZHAO Kun,CAI Zhen-hao

(Alcatel-Lucent Shanghai Bell Co., Ltd.,Shanghai 201206,China)

Abstract:Beam forming in TD-LTE systems is affected by the mis-match between receiver and transmitter antenna number. The antenna mis-match problem can be solved by uplink multiple antenna transmission in TD-LTE-Advanced(TD-LTE-A) systems,which should be analyzed so as to optimize the beam forming performance. By using singular value decomposition(SVD) for uplink multiple antenna channel state information(CSI),it points out that beam forming can improve downlink signal-to-noise ratio(SNR). According to the difference between SNR and channel quality indicator(CQI) when beam forming is used,an optimized link adaptation method is proposed. Simulations show the maximum 24% downlink throughput gain is improved by the optimized beam forming in TD-LTE-A systems in comparison with the TD-LTE systems. The conclusion has obvious value for the commercial network evolution from TD-LTE to TD-LTE-A.

Key words:MIMO;TD-LTE-A system;beam forming;channel quality indicator;link adaptation;performance optimization

1 引 言

在过去的 20 年间,多输入多输出(MIMO)被广泛认为是无线通信系统中的关键技术之一^[1],大致

可以分为空间分集、空间复用以及波束成形(Beam Forming)三大类技术。TDD 长期演进(TD-LTE)系统从一开始就引入了下行单用户 MIMO(SU-MI-

* 收稿日期:2014-05-09;修回日期:2014-07-25 Received date:2014-05-09;Revised date:2014-07-25
基金项目:国家科技重大专项(2012ZX03001010)
Foundation Item:The National Science and Technology Major Project(2012ZX03001010)

** 通讯作者:kun. a. zhao@ alcatel-sbell. com. cn Corresponding author:kun. a. zhao@ alcatel-sbell. com. cn

• 1177 •

MO)的多种传输模式,后续又逐步引入了多用户 MIMO(MU-MIMO)和多点协作(CoMP)。作者长期致力于下行 Beam Forming 技术的研究和设计工作,并在文献[2-3]中指出 Beam Forming 性能会受到不准确的信道状态信息(CSI)如信道估计误差、时延以及终端收、发天线的不对称性的影响。除此之外,射频通道的校准误差和链路自适应也会损害信道互易性的准确程度从而降低作 Beam Forming 的性能。因此,Beam Forming 是对实际系统设计最具有挑战的技术之一,值得探讨和研究。

作为 TD-LTE 的演进,TD-LTE-Advanced(TD-LTE-A)系统通过引入上行 SU-MIMO 解决了终端多天线发送的问题^[4]。TD-LTE-A 支持上行最多 4 天线发送,那么对于小于等于 4 根天线的终端来说,收、发天线不对称性的问题就不存在了,从而使基站可以获得更加准确的 CSI。基于 TD-LTE-A 的这一新特性,本文分别从终端信噪比(SNR)和基站自适应编码调制(AMC)的角度展开,定性和定量地分析了对下行 Beam Forming 性能的改进。

2 系统模型

考虑发送机有 M 根天线、接收机有 N 根天线的下行多输入多输出(MIMO)系统,基带信号表达式为

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{H}_{\text{DL}}\boldsymbol{w}\boldsymbol{s}+\boldsymbol{n} \tag{1}$$

其中, $\boldsymbol{r}$ 是 $N\times 1$ 的接收信号矢量; $\boldsymbol{H}_{\text{DL}}$ 是 $N\times M$ 的下行信道矩阵; $\boldsymbol{w}$ 是 $M\times 1$ 的 Beam Forming 权重矢量; $\boldsymbol{s}$ 是 1×1 的发送数据; $\boldsymbol{n}$ 是 $N\times 1$ 的接收噪声矢量,噪声方差为 σ^2 。

根据信道互易性原理, $\boldsymbol{w}$ 需要根据上行 CSI 计算得到的。假设上行 CSI 是理想的,那么有

$$\boldsymbol{H}_{\text{UL}}=\boldsymbol{H}_{\text{DL}} \tag{2}$$

对 $\boldsymbol{H}_{\text{UL}}$ 做奇异值分解(SVD)取右特征矢量即可以得到 $\boldsymbol{w}$ 。

TD-LTE-A 中用于数据测量和解调的主要有小区级参考信号(CRS)、解调参考信号(DMRS)和 CSI 参考信号(CSI-RS)^[5],时频资源映射在不同的位置,如图 1 所示。其中,DMRS 和 PDSCH 信号使用相同的权重 $\boldsymbol{w}$,由终端侧用来做共享数据信道信号的解调参考信号。CRS 或者 CSI-RS 可以用于终端测量链路质量指示(CQI)反馈给基站用于 AMC 设计^[6]。

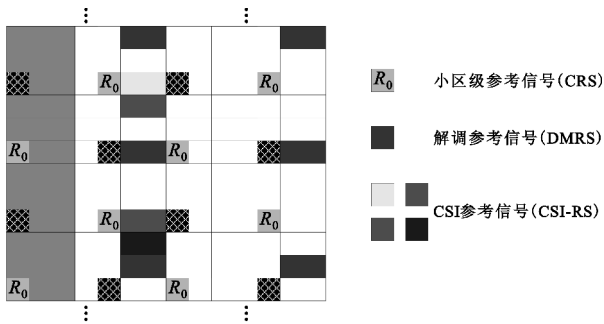


图 1 TD-LTE-A 的 CRS、DMRS 和 CSI-RS 示意图
Fig. 1 Block diagram for cell-specific reference signals, demodulation reference signals and CSI reference signals in TD-LTE-A

易知在 LTE-A 系统中,一方面,通过权重 $\boldsymbol{w}$ 对共享数据信道信号进行加权处理获取波束成形增益;而另一方面,UE 侧通过 CRS/CSI-RS 信号估计接收信噪比,生成 CQI 信息上报给 eNodeB,以选择适合的 MCS 以及链路自适应等。容易看出,终端解调 PDSCH 数据时候的信噪比 SNR_{DMRS} 与 UE 选择上报 CQI 体现的 SNR 是有差异的 $SNR_{\text{CSI-RS}}$,解析式分别为

$$SNR_{\text{DMRS}}=\frac{\|\boldsymbol{H}_{\text{DL}}\boldsymbol{w}\|_F^2}{\sigma^2} \tag{3}$$

$$SNR_{\text{CSI-RS}}=\frac{\|\boldsymbol{H}_{\text{DL}}\|_F^2}{\sigma^2} \tag{4}$$

3 性能分析和优化

在 TD-LTE 系统中,上行终端发送天线只需要 1 根就可以达到标准化的要求,而下行最少需要 2 根终端接收天线才可以达到要求。因此,TD-LTE 的终端发送是小于接收天线个数的,使得公式(2)不能满足,导致信道互易性不理想。如假设基站 8 根天线, $\boldsymbol{H}_{\text{DL}}$ 是 2×8 的矩阵,而 $\boldsymbol{H}_{\text{UL}}$ 只能获得 $\boldsymbol{H}_{\text{DL}}$ 中的一列,即 1×8 的矢量,表示为 $\boldsymbol{H}_{\text{UL},1}$ 。TD-LTE-A 系统中,上行终端发送天线可以支持最大 4 根,也就是解决了 TD-LTE 中上行不能够多天线发送的问题。以 2 根物理天线的终端为例,只要具备了上行 2 天线发送,就可以在基站端获得 2×8 的矩阵 $\boldsymbol{H}_{\text{UL},2}$,假设其他对 CSI 影响的因素均为理想的,那么就可以使

$$\boldsymbol{H}_{\text{UL},2}=\boldsymbol{H}_{\text{DL}} \tag{5}$$

Beam Forming 的一个主要目标是最大化公式(3)中的 SNR_{DMRS} 。为方便分析,假设 $\boldsymbol{H}_{\text{UL},2}$ 为秩为 1 的矩阵,非 0 特征值为 $\lambda_{\text{UL},2}$,结合公式(2)以及 $\boldsymbol{w}$ 是 $\boldsymbol{H}_{\text{UL},2}$ 的右特征矢量,有

$$SNR_{DMRS} = \frac{\| \mathbf{H}_{DL} \mathbf{w} \|^2_F}{\sigma^2} = \frac{\| \mathbf{H}_{UL,2} \mathbf{w} \|^2_F}{\sigma^2} = \frac{\lambda_{UL,2}}{\sigma^2} \quad (6)$$

可见基站获得更完整的 CSI 可以提取出矩阵最大特征值以提高 SNR。

物理层的 SNR 增益可以有效降低终端的误块率(BLER),但是并不一定能换来更高的吞吐率。TD-LTE 和 TD-LTE-A 均使用基于 CQI 的 AMC 方法,只有 CQI 的提高才能换来更高的吞吐率。但是,从公式(3)和(4)的对比可见,终端只基于 CRS 和 CSI-RS 测量得到的 SNR 与基于 DMRS 的不同,并不能体现权重 $\mathbf{w}$ 带来的 SNR 的变化。因此,为了获得更准确的链路自适应,需要在基站端修正 SNR。

CQI 是 SNR_{CSI-RS} 的一种折算,基站端将 CQI 先映射回 SNR_{CSI-RS} ,再设计修正 SNR 为

$$\Delta SNR = \frac{\| \mathbf{H}_{UL,2} \mathbf{w} \|^2_F}{\| \mathbf{H}_{UL,2} \|^2_F} \quad (7)$$

结合公式(4)和(7),定义 SNR_{MCS} 为

$$\begin{aligned} SNR_{MCS} &= SNR_{CRS_CSI-RS} \times \Delta SNR = \\ &= \frac{\| \mathbf{H}_{DL} \|^2_F}{\sigma^2} \times \frac{\| \mathbf{H}_{UL,2} \mathbf{w} \|^2_F}{\| \mathbf{H}_{UL,2} \|^2_F} = \\ &= \frac{\| \mathbf{H}_{DL} \|^2_F}{\sigma^2} \times \frac{\| \mathbf{H}_{DL} \mathbf{w} \|^2_F}{\| \mathbf{H}_{DL} \|^2_F} = \\ &= \frac{\| \mathbf{H}_{DL} \mathbf{w} \|^2_F}{\sigma^2} = SNR_{DMRS} \end{aligned} \quad (8)$$

易知,基站通过 SNR_{MCS} 去索引合适的编码调制集(MCS)就可以达到与终端反馈 SNR_{DMRS} 相同的目的。

4 数值仿真

本节根据 3GPP 协议规定的 PDSCH 信号发送和接收流程分别对 TD-LTE 和 TD-LTE-A 链路性能进行仿真评估。基站采用如图 2 所示的 8 天线模型,信道分别采用 IMT-A 的城区宏基站直射径(Urban Macro LOS)模型^[4]和 SCME 的城区宏基站散射径(Urban Macro NLOS)模型^[7],详细仿真参数设置如表 1。TD-LTE 链路仿真中用于 MCS 调度的 SNR 同公式(4),TD-LTE-A 的同公式(8)。

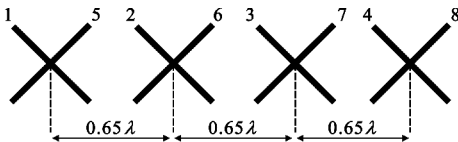


图 2 LTE 基站 8 天线示意图
Fig. 2 8 antennas in LTE base station

表 1 仿真条件及参数设置 Table 1 Simulation condition and reference setting	
仿真参数	配置和取值
接收机类型	MMSE
信道模型	IMT-A Urban Macro LOS SCME Urban Macro NLOS
用户移动速度/(km · h ⁻¹)	3
系统带宽/MHz	20(100PRB)
天线配置数目(Tx,Rx)	LTE 终端:下行(8,2); 上行(1,8) LTE-A 终端:下行(8,2); 上行(2,8)
信道估计	完美估计
CQI 反馈周期/ms	10
上行 Sounding 信号周期/ms	10
AMC 与 HARQ 功能	打开

采用分析的 CQI 修正算法,分别在 IMT-A 以及 SCME 信道环境下针对 TD-LTE、TD-LTE-A 下的系统吞吐率性能进行仿真,结果如图 3 和图 4 所示。由仿真结果可以看出,使用了终端 2 天线发送和基站修正 SNR 的 LTE-A 链路均获得了优于 LTE 的性能,可以认为即使考虑了诸多不完善因素,如多径环境、终端移动速度、SRS 的时延和信道估计误差以及 CQI 的时延,本文提出的方法仍然可以优化链路性能。另外,由图 3 和图 4 可以看出 LOS 信道下的增益会明显大于 NLOS,其中 TD-LTE-A 相比 TD-LTE 在 LOS 信道下最大可以达到 24% 的吞吐率增益。由式(5)可以看出,SNR 的增益来自于信道矩阵的特征值,而 LOS 信道的能量比 NLOS 信道更集中,特征值更大,也就更适合体现 Beam Forming 增益。

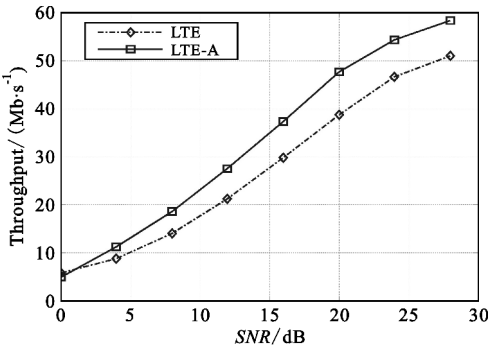


图 3 IMT-A 信道下的下行 SU-MIMO 吞吐率
Fig. 3 Downlink SU-MIMO throughput in IMT-A channel

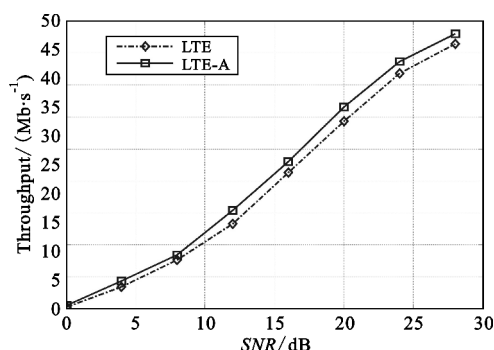


图4 SCME 信道下的下行 SU-MIMO 吞吐量

Fig. 4 Downlink SU-MIMO throughput in SCME channel

5 结 论

本文从 MIMO 系统互易性模型出发,指出对于小于等于 4 根物理天线的终端,TD-LTE-A 解决了 TD-LTE 遗留的终端收、发天线个数不对称的问题,并且提出了利用 CSI 修正基站 SNR 的方法以改进 AMC 的性能。在完善的下行 SU-MIMO 链路级仿真中,分析了 TD-LTE-A 相比 TD-LTE 的性能优化。从特征值大小的角度,解释了 LOS 信道下 TD-LTE-A 的性能优势会更加明显,最大达到了 24% 的吞吐量增益。

文中分析方法和思路可以用于指导 TD-LTE-A 系统中下行 SU-MIMO 的设计工作,对现存的 TD-LTE 网络演进到 TD-LTE-A 具有实用价值,也容易推广到其他基于信道互易性设计 Beam Forming 的无线通信系统。同时,本文只针对信道互易性中收、发天线不对称问题有所研究,后续,作者和所在团队也将围绕 TD-LTE-A 中 Beam Forming 对抗其他信道互易性误差的方法展开更深入研究。

参考文献:

- [1] Boccardi F, Clerckx B, Ghosh A, et al. Multiple-Antenna Techniques in LTE-Advanced[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(3): 114-121.
- [2] 赵昆, 周宝龙, 胡波, 等. TDD 系统中不准确的 CSI 对 MISO 传输的影响[J]. 电讯技术, 2009, 49(2): 1-4.
ZHAO Kun, ZHOU Bao-long, HU Bo, et al. Impact of Imperfect Channel State Information on MISO Transmission in TDD System [J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(2): 1-4. (in Chinese)

- [3] 赵昆, 蒋智宁. 不理想的信道互易性对波束成形技术的影响[J]. 电讯技术, 2013, 53(1): 60-62.
ZHAO Kun, JIANG Zhi-ning. Impact of Non-ideal Channel Reciprocity on Beam Forming[J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(1): 60-62. (in Chinese)
- [4] 3GPP 36.814 v9.0.0, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) [S].
- [5] 3GPP 36.211 v b.2.0, Physical Channels and Modulation[S].
- [6] 3GPP 36.213 v b.2.0, Physical layer procedures[S].
- [7] Baum D S, Hansen J. An Interim Channel Model for Beyond-3G Systems[C]//Proceedings of 2005 IEEE Vehicular Technology Conference. Stockholm, Sweden: IEEE, 2005: 3131-3136.

作者简介:



赵 昆(1979—),男,安徽安庆人,分别于 2001 年和 2006 年获中国科学技术大学电子工程与信息科学系学士学位和博士学位,2007 年后一直在上海贝尔股份有限公司从事 TD-LTE 的系统设计和物理层算法的研究,2013 年后同时担任国家科技重大专项“新一代宽带无线移动通信网”子课题“TD-LTE-Advanced 系统试验设备开发”的负责人,拥有接近 30 篇学术论文和专利;

ZHAO Kun was born in Anqing, Anhui Province, in 1979. He received the B. S. degree and the Ph. D. degree from University of Science and Technology of China in 2001 and 2006, respectively. After 2007, He has worked on TD-LTE system engineering and physical layer algorithm study in Alcatel Lucent Shanghai Bell company. Since 2013, he has been the project leader of “TD-LTE-Advanced demo system development” in National Science and Technology Major Project “New Generation Wideband Mobile Communication Network”. He has published nearly 30 papers and patents.

Email: kun. a. zhao@alcatel-sbell. com. cn

蔡振浩(1979—),男,福建宁德人,2012 年于解放军信息工程大学获通信与信息系统专业博士学位,现为上海贝尔股份有限公司与上海交通大学联合培养博士后,主要从事 TD-LTE-A 的系统设计与物理层算法研究。

CAI Zhen-hao was born in Ningde, Fujian Province, in 1979. He received the Ph. D. degree from Information and Engineering University of PLA in 2012. He is now receiving joint education by Alcatel Lucent Shanghai Bell Co., Ltd. and Shanghai Jiaotong University. His research concerns TD-LTE-Advanced system design and physical layer algorithm design.