

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.01.012

不理想的信道互易性对波束成形技术的影响^{*}

赵 昆^{**}, 蒋智宁

(上海贝尔股份有限公司, 上海 201206)

摘 要:在无线通信系统中, 基站可以根据信道互易性使用波束成形(Beam Forming)技术提升系统性能。信道互易性的准确程度对性能是有影响的, 因此需要对其分析以指导系统设计。对长期演进(LTE)系统的互易性进行建模, 指出了终端发送天线和接收天线数目的不对称性, 以及基站信道估计的误差对信道互易性的影响。通过数值仿真验证了不理想的信道互易性使波束成形性能受到损失, 并为系统改进提出思路。其结论容易推广到其他应用波束成形的无线通信系统。

关键词:无线通信; LTE 系统; 波束成形; 信道互易性

中图分类号: TN929 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-893X(2013)01-0060-03

Impact of Non-ideal Channel Reciprocity on Beam Forming

ZHAO Kun, JIANG Zhi-ning

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

Abstract: In wireless communication systems, the base station can use beam forming to improve performance based on channel reciprocity. The performance depends on accuracy of channel reciprocity, which should be analyzed so as to guide system design. This paper models the channel reciprocity in LTE(Long Term Evolution) systems, and then points out that the mis-match between the transmitter and receiver antenna number of the user equipment and the channel estimation error at the base station can make the channel reciprocity non-ideal. Simulation verifies that the performance of the beam forming is degraded by the non-ideal channel reciprocity. Ideas to improve system performance are proposed. The conclusions are easily applied for other wireless communication systems with beam forming.

Key words: wireless communication; LTE system; beam forming; channel reciprocity

在无线通信系统中, 基站通过使用波束成形(Beam Forming)技术提升系统性能^[1]。根据信道互易性, 基站可以通过估计终端上行发送信号获得信道状态信息(CSI), 用其计算波束成形的加权。因此, CSI的准确性对波束成形性能会产生影响, 文献[2]对无编码的窄带多输入单输出(MISO)系统中的不理想 CSI进行了理论分析。

然而, 无编码的窄带 MISO 系统并不完全符合实际无线通信系统的特性, 如长期演进(LTE)系统就是有信道编码的宽带正交频分复用(OFDM)多输

入多输出(MIMO)系统^[3]。为了指导实际系统的设计, 本文定性分析了 LTE 中导致信道互易性不理想的主要因素, 并定量分析了该因素对波束成形增益的影响。

1 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

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

^{*} 收稿日期: 2012-08-17; 修回日期: 2012-11-13 Received date: 2012-08-17; Revised date: 2012-11-13
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

其中, $\mathbf{r}$ 是 $N \times 1$ 的接收信号矢量, $\mathbf{H}_{\text{DL}}$ 是 $N \times M$ 的下行信道矩阵, $\mathbf{w}$ 是 $M \times 1$ 的波束成形权重矢量, s 是 1×1 的发送数据, $\mathbf{n}$ 是 $N \times 1$ 的接收噪声矢量。

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

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

由文献[4], 对 $\mathbf{H}_{\text{UL}}$ 做奇异值分解(SVD)即可以得到 $\mathbf{w}$ 。

2 问题分析

在 LTE 系统标准化过程中, 对上行和下行的峰值速率提出了不同的要求。如文献[5]所给出的, 在 20 MHz 的系统中, 子帧结构 1 下, 下行 2 发 2 收的系统要达到 172.8 MHz 的速率, 而上行只要达到 86.4 MHz。这说明 LTE 的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, LTE 的终端发送是小于接收天线个数的。

同时, LTE 系统的上行 CSI 是通过对上行参考信号的信道估计来获取的, 而信道估计带来的误差随着接收信噪比(SNR)的变小而变大。需要说明的是, 虽然上行有功率控制, 但是当终端发送功率达到最大, 功控就不能补偿路损, 上行的 SNR 会随着路损的变大而变小。

综上, 终端收、发天线不对称和基站信道估计误差这两个因素, 均使得公式(2)不能满足, 导致信道互易性不理想。

3 数值仿真

采用基站 8 发、终端 2 收的 LTE 系统, 8 根基站发送天线为交叉极化天线, 如图 1 所示, 其中天线间距是 0.5 倍波长。终端 2 天线采用了两种模型, 一种是交叉极化, 另一种是垂直极化且间距 0.5 倍波长。信道模型采用 IMT - A 的城区宏基站直射径(Urban Macro LOS)模型^[6]。终端上行发送天线只有 1 根, 通过上行信号基站获得 CSI 并采用 SVD 分解获得波束成形权重。

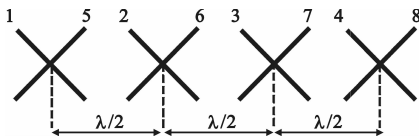


图 1 LTE 基站 8 天线示意图
Fig.1 8 antennas in LTE base station

为了量化波束成形增益, 在 LTE 的终端中分别测量小区级参考信号(Cell-specific Reference Signal)的参考信号接收功率(RSRP)和用户级参考信号(UE-specific Reference Signal)的 RSRP, 由于小区级参考信号没有使用波束成形, 而用户级参考信号使用了波束成形, 通过两种参考信号的 RSRP 的差值可以体现波束成形带来的增益。理论上 8 天线的增益是 $10\lg 8 = 9\text{ dB}$ 。

在 LTE 下行传输模式 7 中通过固定下行的 SNR, 改变上行的 SNR 来分析波束成形增益的变化, 如图 2 所示。当上行 SNR 取 10 dB 即一般的上行功控目标值的时候, 波束成形增益达到最大值, 但是, 由于终端收、发天线不对称, 基站不能获得完整的 CSI, 所以最大的波束成形增益在两种终端天线配置下均小于理论值 9 dB。当终端天线配置为垂直极化的时候, 由于两根天线相关性高, 因此即使基站只得到其中 1 根天线的 CSI, 所产生的波束也可以有效覆盖另外 1 根天线, 因此最大波束成形增益达到 8 dB, 只损失了 1 dB。但是当终端天线配置为交叉极化即相关性低的时候, 最大波束成形增益只能达到 5 dB, 因为没有发送数据的那根终端天线基本没有增益。这说明收、发天线的不对称性使波束成形增益不能达到理论值, 对天线相关性低的终端, 更加需要改进收、发天线的不对称情况。

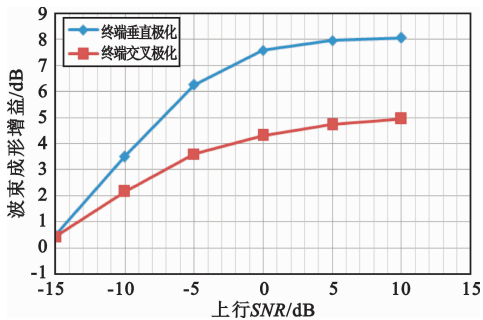


图 2 波束成形增益与上行 SNR
Fig.2 Beam forming gain with uplink SNR

随着上行功率控制失效, 也就是终端满功率发送还不能补偿路损的时候, SNR 下降, 从图 2 中可以看出, 波束成形增益会随着 SNR 一起下降。这说明当功率控制和小区规划都不能保证合适的 SNR 工作范围的时候, 需要增强波束成形算法对信道估计误差的鲁棒性来获得比较理想的波束成形增益。

4 结 论

本文建立了 MIMO 系统互易性模型, 结合 LTE 定

性分析了造成信道互易性不理想的两方面原因,即终端的收、发天线个数不对称和基站信道估计误差。针对波束成形增益这个指标,定量分析了当信道互易性不理想时,波束成形性能受到的影响。该结果可以用于指导现有系统的设计、开发和测试工作。

在此基础上,提出了两点改进波束成形性能的思路:一是保证终端的收、发天线个数是相等的,二是增强波束成形算法的鲁棒性。对于改进思路,还需要后续的研究来量化对性能的提升。同时,随着对 LTE 商用化网络的应用,还可能会遇到其他对信道互易性产生影响的因素。

文中的分析方法和思路较为通用,因此容易推广到其他基于信道互易性设计波束成形的无线通信系统。

参考文献:

- [1] Godara L C. Applications of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part I: Performance Improvement, Feasibility, and System Considerations[J]. Proceedings of the IEEE, 1997,85(7):1031-1060.
- [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 Systems[J]. Telecommunication Engineering, 2009,49(2):1-4. (in Chinese)
- [3] 3GPP 36.211 v10.4.0, Physical Channels and Modulation[S].
- [4] Telatar E. Capacity of multi-antenna Caussion channels[J]. European Transactions on Telecommunication ETT, 1999, 10(6):585-596.
- [5] 3GPP 25.912 v8.0.0, Feasibility study for evolved Universal Terrestrial Radio Access[S].

- [6] 3GPP 36.814 v9.0.0, Further advancements for E-UTRA physical layer aspects[S].

作者简介:



赵 昆(1979—),男,安徽安庆人,分别在 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 至 2009 年在上海贝尔股份有限公司与复旦大学联合培养博士后工作,主要研究方向是 LTE 系统中多天线技术;2009 年之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;目前在国内、外的期刊和会议共发表 10 余篇学术论文,并已申请国内专利 10 余项;

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. From 2007 to 2009, he was receiving joint education by Alcatel Lucent Shanghai Bell Co., Ltd. and Fudan University. His main study direction is multiple antenna techniques in LTE systems. After 2009, he has worked on TD-LTE system architecture design and physical layer algorithm study in Alcatel Lucent Shanghai Bell Co., Ltd. He has published more than 10 papers and applied for 10 patents.

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

蒋智宁(1976—),男,湖南邵东人,分别在 1997 年和 2000 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硕士学位,现在上海贝尔股份有限公司从事无线移动通信系统的研发、设计;目前作为 TD-LTE 的系统设计经理,负责多个软件版本的系统设计以及仿真的工作。

JIANG Zhi-ning was born in Shaodong, Hunan Province, in 1976. He received the B.S. degree and the M.S. degree from University of Science and Technology of China in 1997 and 2000, respectively. He is now working on mobile communication system research, design and development in Alcatel Lucent Shanghai Bell Co., Ltd. He is responsible for software design and simulation as a TD-LTE system design manager.