

文章编号:1001-893X(2010)03-0045-04

天线校准误差建模及对开环波束赋形技术的影响^{*}

李亚麟^{1,2}, 樊 迅¹, 胡 波², 李春亭¹

(1. 上海贝尔股份有限公司, 上海 200070; 2. 复旦大学, 上海 200433)

摘 要:时分双工系统中上下行无线信道具有互易性,使得基站可以利用获得的上行信道信息实施开环波束赋形技术。但是基站天线口与基带处理模块之间的射频通道并不对称,在进行校准后由于硬件精度所限会有天线校准误差。为此,根据实测数据对天线校准误差进行建模,通过仿真得出,射频通道校准幅度误差标准差在 1 dB、角度误差在 20°以内时,开环波束赋形技术在误码率为 10^{-5} 时性能损失小于 1 dB。并由此给出了对天线校准误差的要求。

关键词:时分双工;多输入多输出;开环波束赋形;天线校准误差;信道互易性

中图分类号:TN929.5 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2010.03.010

Modeling of Antenna Calibration Error and its Impact on Open-Loop Beamforming

LI Ya-lin^{1,2}, FAN Xun¹, HU Bo², LI Chun-ting¹

(1. Alcatel-Lucent Shanghai Bell Co., Ltd., Shanghai 200070, China;

2. Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The reciprocity between TDD (Time Division Duplex) uplink and downlink wireless channels makes it realizable to apply the uplink channel estimated result for open-loop beamforming. However, the RF(Radio Frequency) paths between antennas and base-band module are not symmetrical, which would degrade the performance of beamforming. This paper models the antenna calibration error, and the simulation results show that within 1dB standard deviation of calibration amplitude error, and 20° phase error, the performance degradation is less than 1dB at 10^{-5} BER(Bit Error Rate). And this conclusion gives the accuracy requirement of antenna calibration.

Key words: time division duplex(TDD); MIMO; open-loop beamforming; antenna calibration error; channel reciprocity

1 引 言

多天线技术的应用,可以在不增加发射功率和传输带宽的前提下提高系统的数据速率和传输质量。在发送端不具备信道信息时,系统能够获得多天线的分集增益,但是无法获得阵列增益^[1]。为了进一步挖掘出多天线的性能增益,需要在系统发送

端获得信道信息^[2]。

相对于频分双工(FDD)系统而言,时分双工(TDD)系统可以利用特有的无线信道互易性,通过上行信号获得信道信息,并将这些信道信息应用于下行发送的开环波束赋形技术中,有效地挖掘出系统发端的多天线增益,获得较好的传输性能。在实际的系统中,完整的信道互易性不仅包括无线信道

^{*} 收稿日期:2009-12-03;修回日期:2010-03-03

基金项目:国家科技重大专项“TD-LTE 系统预商用设备开发”课题(2009ZX03002-001)

Foundation Item: The National S&T Major Project "PreCommercial Equipment R&D for TD-LTE System" (No. 2009ZX03002-001)

的互易性,还包括天线口与基带处理模块之间射频通道的互易性;为了增强射频通道的互易性,通常在系统基站侧会采用天线校准。然而,由于硬件精度所限,仍不可避免会存在天线校准误差,影响信道互易性,损害开环波束赋形的性能。因此,需要评估开环波束赋形技术在天线校准误差存在情况下的性能损失。

为了进行该评估工作,首先需要对基站天线校准误差进行建模。在一些文献与 3GPP 提案当中,将天线校准误差的幅度和相位分别进行建模。特别地,认为天线校准幅度误差为正态分布^[3]。本文根据天线的实测数据,将天线校准幅度误差建模为对数正态分布。并在此基础上,评估了开环波束赋形技术的性能受天线校准误差的影响。

2 系统模型

如图 1 所示,基站端(BS)有 M 根天线,终端用户(MS)有 N 根天线, $M \geq N$ 。通常,TDD 系统认为 BS 与 MS 之间的无线信道具有互易性,即上行与下行的无线信道是相同的。

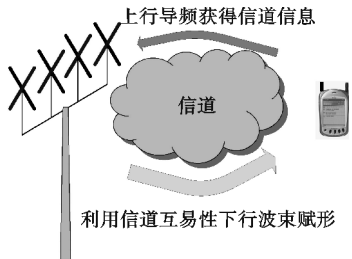


图 1 系统天线配置示意图

Fig. 1 Antenna configuration of the system

理想信道估计情况下,基站端根据上行信道信息 $\mathbf{H}_{up}$,采用 SVD 分解的方法产生开环波束赋形加权矩阵/矢量^[4],即:

$$(\mathbf{U}, \mathbf{\Sigma}, \mathbf{V}) = \text{svd}(\mathbf{H}_{up}) \text{ 或 } \mathbf{H}_{up} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H \quad (1)$$

式中, $(\cdot)^H$ 表示矩阵的共轭转置操作; $\mathbf{H}_{up}$ 为 $M \times N$ 矩阵;相应地, $\mathbf{U}, \mathbf{V}$ 分别为 $M \times M$ 与 $N \times N$ 的西矩阵; $\mathbf{\Sigma}$ 为 $M \times N$ 矩阵,其顶部 $N \times N$ 子矩阵为上行信道矩阵的特征值 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, N)$ 按照降序排列构成的对角阵,底部 $(M-N) \times N$ 子矩阵元素均为 0。

单流/多流加权矢量/矩阵即为 $\mathbf{U}$ 矩阵中与特征值对应的第一列或前多列特征向量的共轭向量。以双流开环波束赋形为例,标识 $\mathbf{U}$ 的第一、二列的特征向量为 $\mathbf{u}_1$ 和 $\mathbf{u}_2$,不妨记加权矩阵为

$$\mathbf{U}_{12} \triangleq \text{conj}[\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2]$$

$\text{conj}(\cdot)$ 表示共轭操作。记下行发送两组数据流为 $\mathbf{s} = [s_1, s_2]^T$,接收端 $N \geq 2$ 天线接收信号 $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$,高斯噪声矢量 $\mathbf{n} = [n_1, n_2, \dots, n_N]^T$,则有:

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{H}_{dw} \mathbf{U}_{12} \mathbf{s} + \mathbf{n} = \\ &= \mathbf{H}_{up}^T \mathbf{U}_{12} \mathbf{s} + \mathbf{n} = \\ &= (\mathbf{V}^H)^T \sum^T \mathbf{U}^T \mathbf{U}_{12} \mathbf{s} + \mathbf{n} = \\ &= (\mathbf{V}^H)^T \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \\ & & 0 \end{bmatrix}_{N \times 2} \mathbf{s} + \mathbf{n} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $(\cdot)^T$ 表示矩阵的转置操作。等式中分别利用了上下行信道的互易特性与 $\mathbf{U}$ 的西矩阵特性。将 $\mathbf{V}$ 写成列矢量的形式: $[\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_N]$,则 $(\mathbf{V}^H)^T = \text{conj}[\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_N]$ 。这样,接收信号即为

$$\mathbf{y} = [\text{conj}(\mathbf{v}_1) \lambda_1 \text{conj}(\mathbf{v}_2) \lambda_2] \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (3)$$

根据 $\mathbf{V}$ 的西矩阵特性,列矢量 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ 的模均为“1”,从而基于 SVD 算法的波束赋形技术能够实现最大能量传输数据流的目的。

由上述推导知,TDD 系统的开环波束赋形技术是以信道互易性为基本条件的。然而事实上,BS 端天线口到基带处理模块之间,接收与发送信号分别通过不同的射频通道。这样,整体等效信道的互易性就遭到破坏。

记 $\mathbf{\Lambda}_{up}$ 为基站端天线与基带处理模块之间射频通道的响应矩阵,简称接收天线射频响应矩阵。可以将该矩阵元素写成幅度响应和相位响应的形式:

$$\mathbf{\Lambda}_{up} = \text{diag}[p_1 e^{j\theta_1} \quad p_2 e^{j\theta_2} \quad \dots \quad p_M e^{j\theta_M}] \quad (4)$$

显然,理想校准时,接收天线射频响应矩阵为单位阵,即 $\mathbf{\Lambda}_{up} = \mathbf{I}_M$ 。

类似地,定义基站端发送天线射频响应矩阵 $\mathbf{\Lambda}_{dw}$,则射频通道对开环波束赋形技术的影响可通过式(5)看出:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}_{dw} \mathbf{\Lambda}_{dw} \mathbf{U}'_{12} \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{U}'_{12}$ 是 $\mathbf{U}'$ 的前两列的共轭,而 $\mathbf{U}'$ 则是 $\mathbf{\Lambda}_{up} \mathbf{H}_{up}$ 进行 SVD 分解后的结果。

下文将对天线校准误差进行建模,评估在不同精度条件下开环波束赋形传输技术性能的损失,从而为硬件设备的设计提供参考。本文关注的是基站端天线校准误差的影响,不考虑终端用户天线对应的射频通道。

3 天线校准误差建模

基站端天线校准的操作流程如图 2 所示。图中

所示的校准通道与各个天线之间相互收发测试信号,在基站内部形成收发回路,获得各天线收发射频通道的增益。之后,可以根据各通道的不同增益进行相应处理,达到天线校准的目的。

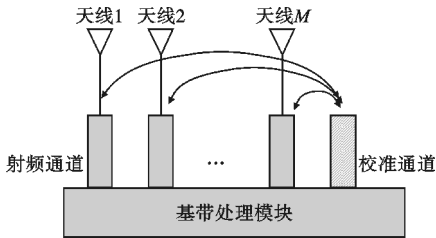


图 2 天线校准操作示意图

Fig. 2 Antenna calibration sketch figure

在上述校准方式下,形成校准偏差的因素有两部分:一部分是校准通道本身所具有的偏差,简称为通道偏差,这种偏差对每个天线射频通道都是相同的;另一部分是在使用同一校准通道进行校准后,各天线射频通道上残留的偏差,简称为残留偏差,这部分偏差对各个射频通道不同,由各自的硬件特性决定。考虑这两部分的偏差是相互独立的,将两部分因素分别考虑。根据两类偏差的特点,以基站接收天线射频通道为例,式(4)可以写成:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{\text{up}} &= \text{diag}[p_1 e^{j\theta_1} \ p_2 e^{j\theta_2} \cdots \ p_M e^{j\theta_M}] = \\ & a e^{j\vartheta} \cdot \mathbf{I}_M * \text{diag}[p'_1 e^{j\theta'_1} \ p'_2 e^{j\theta'_2} \cdots \ p'_M e^{j\theta'_M}] \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)右边是两个对角矩阵的乘积,其中前面的因子 $a e^{j\vartheta} * \mathbf{I}_g$ 是“通道偏差”矩阵,后面因子则是“残留偏差”矩阵。

考虑幅度偏差的建模方法。根据一些硬件厂商提供的数据库,例如文献[5]中关于射频功率放大器幅度增益的图示,将上述两类偏差的幅度部分建模为对数正态分布,即通道偏差幅度 $20 \lg a = 20 \ln a / \ln 10 \sim N(0, \sigma_1^2)$,残留偏差幅度 $20 \ln p'_i / \ln 10 \sim N(0, \sigma_2^2, i=1, 2, \cdots, M)$ 。其中, σ_1, σ_2 分别为两种幅度偏差的标准差。

两类偏差的相位偏差则建模为一定角度范围内的均匀分布,即 $\vartheta \sim \text{mean}[-\Delta\Phi, \Delta\Phi], \theta'_i \sim \text{mean}[-\Delta\phi, \Delta\phi], i=1, 2, \cdots, M$ 。

为了保证等效信道的归一化特性,在无线信道能量期望值归一的前提下,还需要对射频通道响应做统计意义上的归一化处理。将幅度偏差分布的均值进行调整,可以实现该操作,即调整为:

$20 \ln \bar{p} / \ln 10 \sim N(-\ln 10 \sigma^2 / 20, \sigma^2)$, $\bar{p}$ 可代表式(6)中的 $a, p'_i, i=1, 2, \cdots, M$ 。

基站发送射频通道建模方式与接收射频通道是相同的。值得强调的是,它们之间是互相独立的。

4 仿真结果

在仿真中,假设某 TDD 通信系统在基站端采用的是八天线 4+4 双极化正交天线阵,在终端用户采用的是两天线。

首先,通过公式推导,容易得出在只采用一个校准通道的前提下,接收与发射的归一化通道误差在接收信号上分别形成一个模为 1 的复数因子,接收信号的信噪比没有变化,不会影响开环波束赋形技术的性能。因此,只需要重点评估残留误差对开环波束赋形技术的影响。

分别评估天线校准的幅度和相位误差带来的性能损失。认为基站的收发射频通道采用相同的硬件条件,这样收发通道的误差是独立同分布的。

固定天线校准相位误差分布为典型情况,即角度变化范围为 $[-\Delta\phi, \Delta\phi]$, $\Delta\phi = 5^\circ$;幅度误差分布的标准差 σ_2 分别设置为 0.35 dB、1.0 dB、2.5 dB。仿真获得开环波束赋形技术对基站射频通道校准幅度误差的敏感度,如图 3 所示。

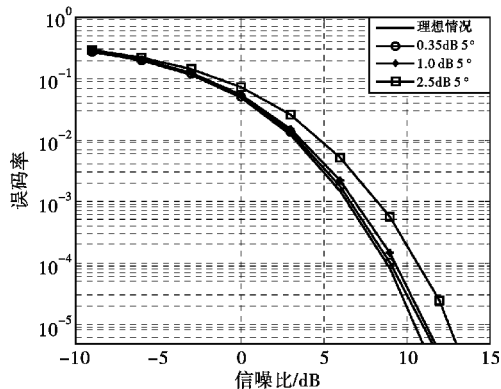


图 3 开环波束赋形技术对天线校准幅度误差的敏感度

Fig. 3 BER sensitivity to amplitude error

固定天线校准幅度误差分布为典型情况,即幅度误差分布的标准差 $\sigma_2 = 0.35 \text{ dB}$;角度变化范围 $[-\Delta\phi, \Delta\phi]$ 中的 $\Delta\phi$ 分别设置为 $5^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 0^\circ$ 。仿真获得开环波束赋形技术对基站射频通道校准相位误差的敏感度,如图 4 所示。

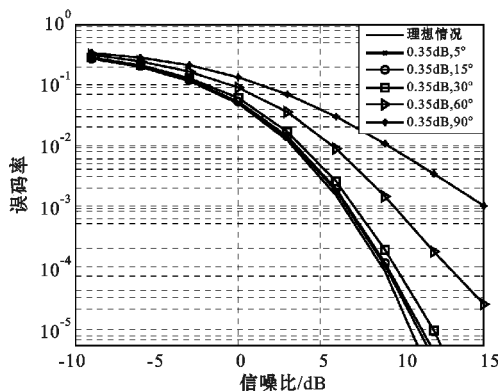


图 4 开环波束赋形技术对天线校准相位误差的敏感度

Fig. 4 BER sensitivity to phase error

通过仿真结果可以看到,基站端天线射频通道的校准误差对开环波束赋形技术是有影响的,随着误差范围的增大,开环波束赋形技术的性能会变差。但是,当误差控制在一定范围内时,开环波束赋形技术的性能对误差的敏感度并不高。若认为误码率在 10^{-5} 的性能损失小于 1 dB 可以接受,则要求幅度误差的标准差小于 1 dB,角度误差的最大值小于 20° 。该结果对于天线射频通道的设计具有一定的参考意义。

5 结 论

在 TDD 通信系统中,利用信道的互易性,由上行信号获得的信道信息可以应用于下行开环波束赋形技术中。然而,由于基站端天线口与基带处理模块之间收发射频通道破坏了等效信道的互易性,使得射频通道的校准对开环波束赋形技术的应用非常重要。本文通过分析实验数据,对射频通道校准误差进行了建模,并在此基础上,评估了开环波束赋形技术对射频通道校准的幅度误差和相位误差的敏感度。仿真结果表明,将射频通道校准幅度误差的标准差控制在 1 dB,角度误差控制在 20° 以内时,开环波束赋形技术的性能损失在误码率等于 10^{-5} 时小于 1 dB。

参考文献:

- [1] Andersen J B. Array gain and capacity for known random channels with multiple elements arrays at both ends[J]. IEEE Journal of Selection Areas Communication, 2000,18(11):2172-2178.
- [2] Telatar I E. Capacity of multi-antenna gaussian channels[J]. Eurol Transactions on Telecommunication, 1999,10(6):585-595.
- [3] Nokia Siemens Networks. R1-091368: Performance

comparison between Tx diversity and single stream precoding[Z]. Seoul:Nokia Siemens Networks, 2009.

- [4] Lebrun G, Gao J, Faulkner M. MIMO transmission over a time-varying channel using SVD[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005,4(2): 757-764.
- [5] Avago Technologies. Datasheet of MGA-14516[Z]. [S. l.]: Avago Technologies, 2009.

作者简介:

李亚麟(1981—),男,安徽阜阳人,2008 年获中国科学技术大学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在站博士后,主要研究方向为多天线信号处理、多天线收发机设计;

LI Ya-lin(male) was born in Fuyang, Anhui Province, in 1981. He received the Ph. D. degree from University of Science and Technology of China in 2008. He is now a post-doctor in the Post-doctorate Work Station in Alcatel-Lucent Shanghai Bell Co., Ltd. His research interests include multi-antenna signal processing and the design of multi-antenna transceiver.

Email: Yalin. Li@alcatel-sbell. com. cn

樊 迅(1975—),男,江苏南京人,2006 年获上海交通大学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无线研发部门系统工程师,主要从事 MIMO 无线通信系统中的信号检测、多用户检测、智能天线理论和技术等的研究;

FAN Xun(male) was born in Nanjing, Jiangsu Province, in 1975. He received the Ph. D. degree from Shanghai Jiaotong University in 2008. He is now a system engineer in Alcatel-Lucent Shanghai Bell Co., Ltd. His research interests are signal detecting in MIMO system, multi-user detecting, smart antenna theory and technology.

胡 波(1968—),男,江苏常州人,1996 年获复旦大学理学博士学位,现为复旦大学电子工程系教授、博士生导师,主要从事数字信息处理、数字通信等方面的理论与算法研究;

HU Bo(male) was born in Changzhou, Jiangsu Province, in 1968. He received the Ph. D. degree from Fudan University in 1996. He is now a professor and doctor advisor in Electronic Engineering Department of Fudan University. His research interests are the theory and algorithm research in digital signal processing, digital communication.

李春亭(1972—),男,安徽合肥人,1999 年获同济大学信号与信息处理专业博士学位,现为上海贝尔股份有限公司无线研发部门总监、高级工程师,主要研究方向为移动通信数字基站系统的设计与开发。

LI Chun-ting(male) was born in Hefei, Anhui Province, in 1972. He received the Ph. D. degree from Tongji University in 1996. He is now a senior engineer, and the majordomo of the wireless R&D Department in Alcatel-Lucent Shanghai Bell Co., Ltd. His research interests are the design and development of digital wireless base-station system.