

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.07.003

引用格式:蔡振浩,陈文,赵昆. TD-LTE 非理想信道互易性下的下行单用户波束成形算法[J]. 电讯技术,2014,54(7):876-880. [CAI Zhen-hao, CHEN Wen, ZHAO Kun. Downlink SU-MIMO Beamforming Strategy for Non-ideal Channel Reciprocity in TD-LTE[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(7): 876-880.]

TD-LTE 非理想信道互易性下的下行单用户波束成形算法*

蔡振浩^{1,2,**}, 陈文², 赵昆¹

(1. 上海贝尔股份有限公司, 上海 201206; 2. 上海交通大学 电子工程系, 上海 200240)

摘要:在 TD-LTE 系统中由于上下行信道的时变特性、干扰非对称特性以及射频器件非对称特性会影响基于信道互易性的波束成形技术应用,降低系统增益。针对非理想信道互易性下的预编码矩阵设计问题,以最大化接收信号平均信干噪比做为目标函数,通过计算信道状态信息(CSI)估计值以及互易性误差的统计自相关矩阵,构造正则矩阵束,将最大化接收信干噪比的预编码矩阵求解问题转化为正则矩阵束的广义特征向量求解问题。计算机仿真验证了算法设计的预编码矩阵能有效增强系统的鲁棒特性。

关键词:TD-LTE 系统;信道状态信息;波束成形;特征矩阵;传输模式 8

中图分类号:TN919.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)07-0876-05

Downlink SU-MIMO Beamforming Strategy for Non-ideal Channel Reciprocity in TD-LTE

CAI Zhen-hao^{1,2}, CHEN Wen², ZHAO Kun¹

(1. Alcatel-Lucent Shanghai Bell Co., Ltd., Shanghai 201206, China;
2. Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The channel information time-varying character, asymmetric cell interference and the RF paths in antennas and the baseband module between uplink and the downlink will worsen the application of reciprocity and reduce the beamforming gain in TD-LTE system. Aiming at designing pre-coding for non-ideal reciprocity, a cost function with maximizing the Signal-to-Interference plus Noise Ratio(SINR) in statistical average way is proposed. The regularization matrix pencil is deduced with the statistical correlation matrix of the prior channel state information(CSI) matrix and the reciprocity mismatch error matrix. The pre-coding matrix designing can be translated to the deriving generalized eigenmatrix. The simulation shows that the algorithm can build a robust system.

Key words: TD-LTE system; channel state information; beamforming; eigen matrix; transmission mode 8

1 引言

在 TD-LTE 系统中,发送方在已知用户信道状态信息(Channel State Information, CSI)的基础上,可

以通过用户配对选择以及做预编码进行发送波束成形(TBF)以获得 MIMO 阵列增益,提升系统性能^[1-2]。3GPP Release 11 协议提出的预编码技术研

* 收稿日期:2014-03-04;修回日期:2014-05-15 Received date:2014-03-04;Revised date:2014-05-15
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: Zhenhao. Cai@alcatel-sbell. com. cn Corresponding author: Zhenhao. Cai@ alcatel-sbell. com. cn

究重点包括单用户多流波束成形技术、多用户多流联合预编码技术、多用户多人多出系统 (Multi User MIMO, MU-MIMO) 下的用户配对策略^[3] 以及多点协作波束成形技术等方面^[4], 而这一技术应用和推广工作在 Release 12 协议中得到了进一步的加强, 成为近年来学者们广泛研究的重点和热点。

TBF 技术实现的前提就是要求发射机尽可能获得准确的 CSI, 时分双工 (Time Division Duplexing, TDD) 系统中主要基于信道互易特性设计预编码矩阵, 获取波束成形增益。尽管在理论上 TD-LTE 系统的信道互易性能使得 eNodeB 侧能够通过上行 Sounding 参考信号获得下行 CSI, 但是在实际系统应用中, 理想的信道互易性通常是不可能实现的。上下行信道的时变特性^[5]、上下行信道干扰的非对称性^[6] 以及上下行信道模拟通道的非对称特性等均会影响 TD-LTE 系统信道互易特性, 降低了 TDD 系统的优势。因此, 结合工程实际对非理想信道互易性的影响因素展开分析、研究非理想互易性下的波束成形与干扰抑制算法设计具有重要的意义。

针对信道估计与 TDD 模式下接收发送的时延导致的 CSI 信息不准确, 文献[7]中推导了接收机 BER 与 CSI 的解析关系, 分析了 CSI 信息的不准确对接收性能的影响, 并通过数值仿真验证了分析结果。完整的信道互易性不仅包括无线信道互易性, 还包括天线口与亟待处理模块之间的射频通道互易性。针对基站天线口与基带处理模块之间的射频通道非对称性, 文献[8]中研究了采用基准信号源进行硬件自校准方法, 主要针对校准通道偏差以及各天线校准残差分析了误差对开环波束成形技术的性能影响。而 LTE 系统中终端发送天线与接收天线数目的不对称也会影响基站信道估计结果, 文献[9]中通过数字仿真验证了不理想的互易性对波束成形性能的影响, 并针对设备商提出了相应的解决思路。

不难看出, 非理想互易性下的波束成形算法研究是 TD-LTE 物理层关键技术研究的一个重要内容, 而以往研究成果中普遍存在问题: 一是影响信道互易性的因素较多, 实际应用中针对各种互易性误差的参数化建模方式将使得建模过于复杂, 且并不总能获得问题的闭式解; 二是以往文献均侧重于对信道互易特性受影响下的误差定量分析, 未能给出含误差下的预编码矩阵闭式解。因此, 非理想互易性的干扰抑制问题、CSI 自相关矩阵 Rank 自适应问题以及单用户多流的波束成形算法设计等问题均是 TD-LTE 预编码算法工程应用中的亟待解决的重点和难点问题。综上所述, 本文重点针对非理想信道

互易性下的单用户 MIMO (Single User MIMO, SU-MIMO) 下行预编码矩阵设计问题, 以最大化接收信号平均信干噪比做为目标函数, 通过计算 CSI 估计值以及互易性误差的统计自相关矩阵, 构造正则矩阵束, 将最大化接收信干噪比的预编码矩阵求解问题转化为正则矩阵束的广义特征向量求解问题, 使设计的权重矩阵既对准最大增益的波束方向又能有效抑制干扰, 该预编码矩阵设计算法能够支持多流传输模式。论文最后通过计算机仿真验证了算法的有效性。

2 问题模型

假设一个下行 SU-MIMO 系统, eNodeB 侧发送天线数目为 M , UE 接收天线数为 N , 则 UE 方的接收信号表达式为

$$\mathbf{r} = \tilde{\mathbf{H}}\mathbf{W}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{r} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 是接收信号向量; $\tilde{\mathbf{H}} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 为下行 CSI 信道信息矩阵; $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{M \times K}$ 为预编码矩阵; $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 是 eNodeB 发送数据; $\mathbf{n}$ 是 $N \times 1$ 的接收噪声矢量。

在实际中信道估计信息通常是含有误差的, 信道互易性是非理想, 亦即有 $\tilde{\mathbf{H}} = \hat{\mathbf{H}} + \mathbf{E}$, 其中 $\hat{\mathbf{H}}$ 是 eNodeB 侧估计得到的 CSI 信息矩阵, $\mathbf{E}$ 是信道互易误差, 可以认为该误差主要来源于: 信道时变特性、信道估计误差、模拟通道互易性差异、干扰的非对称特性引入的信道互易误差等。文献[7]中以平坦衰落的时变瑞利信道为模型, 推导了第 k 时刻信道响应与 $k-D$ 时刻信道响应的解析关系, 如式(2):

$$\mathbf{h}(k) = \rho_d(k)\mathbf{h}(k-D) + \sqrt{(1-|\rho_d(k)|^2)}\mathbf{e}(k) \quad (2)$$

容易计算信道时变性引入的误差为

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{h}(k) - \rho_d(k)\mathbf{h}(k-D) = \sqrt{(1-|\rho_d(k)|^2)}\mathbf{e}(k) \quad (3)$$

文献[8]中给出了天线射频通道校准后的校准偏差以及残余偏差的解析式为

$$\mathbf{A}_{\text{up}} = \text{diag} [p_1 e^{j\theta_1} \quad p_2 e^{j\theta_2} \quad \cdots \quad p_M e^{j\theta_M}] = a e^{j\theta} \cdot \mathbf{I}_M \cdot \text{diag} [p'_1 e^{j\theta'_1} \quad p'_2 e^{j\theta'_2} \quad \cdots \quad p'_M e^{j\theta'_M}] \quad (4)$$

综上所述, 本文的重点是综合考虑造成信道互易性非理想的多种因素, 在已知误差矩阵统计信息的基础上, 研究 SU-MIMO 多流的预编码矩阵设计算法。实际中, 误差矩阵 $\mathbf{E}$ 的获得可以有多种途径, 一方面可以通过选择主要的典型应用场景由基站侧测量以

及 UE 侧反馈等途径获得,另一方面亦可以选择针对主要误差因素通过参数化建模来估计误差。

3 算法描述

已知含误差下的 UE 侧接收信号解析式为

$$\mathbf{r}=\hat{\mathbf{H}}\mathbf{W}\mathbf{s}+(\mathbf{E}\mathbf{W}\mathbf{s}+\mathbf{n})=\mathbf{y}+\mathbf{z} \tag{5}$$

式中, $\mathbf{y}=\hat{\mathbf{H}}\mathbf{W}\mathbf{s}$ 表示信号部分, $\mathbf{z}=\mathbf{E}\mathbf{W}\mathbf{s}+\mathbf{n}$ 表示由噪声和误差引入的干扰部分。考虑到噪声、误差等干扰因素,采用接收信号的统计 SINR 作为目标函数:

$$J(\mathbf{W})=\frac{E\{\mathbf{y}^H\mathbf{y}\}}{E\{\mathbf{z}^H\mathbf{z}\}}=\frac{E\{\mathbf{s}^H\mathbf{W}^H\hat{\mathbf{H}}^H\hat{\mathbf{H}}\mathbf{W}\mathbf{s}\}}{E\{\mathbf{s}^H\mathbf{W}^H\mathbf{E}^H\mathbf{E}\mathbf{W}\mathbf{s}\}+\sigma_0^2} \tag{6}$$

为了分析方便,文中假设接收信号向量 $\mathbf{s}$ 中各流的数据间相互独立,亦即有 $E\{s_i s_j\}=0$ 成立。采用开环模式各数据流等功率发射,对信号功率归一化有 $E\{s_i s_i\}=P/K$, 定义 $\hat{\mathbf{C}}_H=E\{\hat{\mathbf{H}}^H\hat{\mathbf{H}}\}$, $\Phi_E=E\{\mathbf{E}^H\mathbf{E}\}$ 。将式(6)进一步化简为

$$J(\mathbf{W})=\frac{\text{Tr}(\mathbf{W}^H\hat{\mathbf{C}}_H\mathbf{W})}{\text{Tr}(\mathbf{W}^H\Phi_E\mathbf{W})+\sigma_0^2}=\frac{\text{Tr}(\mathbf{W}^H\hat{\mathbf{C}}_H\mathbf{W})}{\text{Tr}\left[\mathbf{W}^H\left(\Phi_E+\frac{1}{\gamma_K}\mathbf{I}_M\right)\mathbf{W}\right]} \tag{7}$$

式中,定义 $\gamma_K=\frac{P/K}{\sigma_0^2}$ 为各流接收信号噪声功率比。因此在非理想信道 CSI 信息下的预编码矩阵最优设计问题就转变为求解:

$$\mathbf{W}=\arg\max_{\mathbf{W}\in\mathbb{C}^{M\times K}}J(\mathbf{W}) \tag{8}$$

注意到 $\left(\Phi_E+\frac{1}{\gamma_K}\mathbf{I}_M\right)$ 是 Hermitian 矩阵且正定,

$\hat{\mathbf{C}}_H$ 是 Hermitian 矩阵,易知 $\left(\hat{\mathbf{C}}_H,\Phi_E+\frac{1}{\gamma_K}\mathbf{I}_M\right)$ 是正则矩阵束。不妨假设 $\lambda_1\geq\lambda_2\geq\cdots\geq\lambda_M\geq 0$ 是该正则矩阵束的广义特征值,则存在矩阵 $\mathbf{X}\in\mathbb{C}^{M\times M}$ 使得^[10]

$$\mathbf{X}^H\hat{\mathbf{C}}_H\mathbf{X}=\Lambda=\text{diag}(\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_M) \\ \mathbf{X}^H\left(\Phi_E+\frac{1}{\gamma_K}\mathbf{I}_M\right)\mathbf{X}=\mathbf{I}_M \tag{9}$$

假设待求解的 $\hat{\mathbf{W}}$ 由正则矩阵束的特征向量组成,因此,式(8)中的极值求解问题就转化为求解正则矩阵束中前 K 个广义特征值 $\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_K$ 所对应的广义特征向量作为预编码矩阵估计值,能够获得使得式(7)联合信号干扰噪声功率比最大化的权重 $\mathbf{W}$ 设计值。

下面结合信道容量函数解释各参数物理意义并设计算法流程。定义 $f(K)$ 为

$$f(K)=\lg\prod_{k=1}^K(1+\lambda_k) \tag{10}$$

其中, λ_k 可以认为是以噪声功率进行归一化后的第

k 个数据流的信干噪比; $f(K)$ 为系统可达信道容量; K 值变化会改变信号 $\mathbf{s}_i$ 中的流数,反映在式(10)中就是改变各流的 SINR 值,最终影响可达信道容量取值。因此,波束成形的预编码矩阵设计中首先要根据当前的 CSI 信息以确定最佳的传输流数,其次是在确定 K 值基础上计算最优的权重。

综上所述,算法设计步骤归纳如下:确定使得信噪比 $f(K)$ 最大化的 K 值,如式(11);求解式(9)中正定矩阵束对应的广义特征值向量,计算公式如式(12)、(13)所示:

$$\hat{K}=\arg\max_K f(K) \tag{11}$$

$$\left(\Phi_E+\frac{1}{\gamma_K}\mathbf{I}_M\right)^{-1}\hat{\mathbf{C}}_H=\mathbf{U}\Sigma\mathbf{U}^H \tag{12}$$

$$\hat{\mathbf{W}}=\mathbf{U}\begin{bmatrix}\mathbf{I}_{K\times K} \\ \mathbf{0}\end{bmatrix} \tag{13}$$

将该算法描述为基于广义特征矩阵分解的波束成形算法 (Generalized Eigenmatrix Based Beamforming, GEBB)。GEBB 算法流程概括如下:

步骤 1: 分别计算 $\hat{\mathbf{H}}, \mathbf{E}$ 的统计自相关矩阵 $\hat{\mathbf{C}}_H, \Phi_E$;

步骤 2: 计算正则矩阵束 $\left(\hat{\mathbf{C}}_H,\Phi_E+\frac{1}{\gamma_K}\mathbf{I}_M\right)$ 广义特

征值 $\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_M$;

步骤 3: 根据式(11)计算信噪比最大化所支持的 K 值;

步骤 4: 根据式(12)计算正则矩阵束的特征矩阵 $\mathbf{U}$;

步骤 5: 根据式(13)计算得到非理想 CSI 信息下的预编码矩阵 $\hat{\mathbf{W}}$ 。

在 CSI 信息非理想情况下,如果直接针对 $\hat{\mathbf{H}}$ 采用奇异值分解(SVD)计算预编码矩阵 $\hat{\mathbf{W}}$,容易受信噪时变特性和干扰因素影响,无疑会降低波束成形增益,因此文中通过计算 CSI 和误差矩阵的统计信息来估计 $\hat{\mathbf{W}}$ 以提高算法鲁棒性。另外,对于式(7),当 $\Phi_E=\mathbf{0}$ 时,此时问题变化为求解 SNR 最大化的预编码设计问题,这种情况下通过提高信噪比能够增大信道容量。

而对于高信噪比情况,式(7)可以近似为 $\text{Tr}(\mathbf{W}^H\hat{\mathbf{C}}_H\mathbf{W})/\text{Tr}[\mathbf{W}^H\Phi_E\mathbf{W}]$,此时问题变为最大化 SIR 的预编码设计问题,这种情况下需要结合正则矩阵束的广义特征值,合理选择所支持的流数以改善系统性能。3GPP 组织在截至 Release 11 中的多种传输模式分别支持 1~8 个流的传输能力,在实际系统应用中可以根据实际信道统计情况合理选择第 3 步中 K 值分析系统所支持的流数,采用最大化信道容量等作为目标函数,设计相应的 Rank 自适应

算法。因此,本算法在实际工程应用中具备良好的推广应用价值。

4 仿真分析

根据 TD-LTE 标准中规定物理层下行共享信道 (Physical Downlink Shared Channel, PDSCH) 信号发送和接收流程,信道模型采用 3GPP SCME Urban Macro 模型,8 发 2 收的情况下分别在 3 km/h、30 km/h 移动速度下,采用 TM8 传输单用户双流,对 GEBB 算法在非理想信道互易性下的系统吞吐量性能进行仿真。对应于 TM8,第 3 步中 K 值取 2。仿真中 E 主要考虑 RF 失配误差以及信道时延误差,仿真条件以及参数设置如表 1。

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	3GPP SCME (Urban Macro)
用户移动速度/(km · h ⁻¹)	3, 30
系统带宽/MHz	20
天线配置数目(Tx, Rx)	(8, 2)
信道估计	理想估计
RF 天线相差[-ΔΦ ΔΦ]	ΔΦ=5°
RF 幅度标准差 σ ² /dB	0.35
传输模式	TM8:单用户双流
MCS	自适应

TM8 传输模式最大支持单个 UE 双流的传输能力。图 1 为采用本文所述 GEBB 算法与无干扰抑制的普通 EBB 算法以及基于 SVD 分解的预编码设计算法的性能比较图。其中,SVD 方法的基本原理是对每个 PRB 的信道估计值 $\hat{H}$ 进行 SVD 分解计算预编码矩阵。仿真在 TM8 传输模式下固定发射双流并采用调制编码方式 (Modulation and Coding Scheme, MCS) 自适应方式测试系统吞吐率性能。

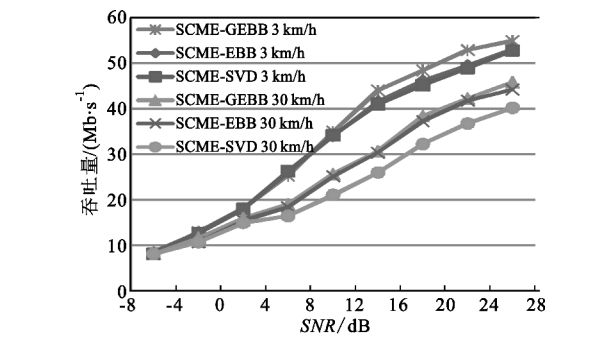


图 1 本文 GEBB 与普通 EBB 算法、SVD 方法吞吐量仿真比较
Fig. 1 The Throughput simulation comparison between Generalized EBB, Common EBB and SVD

由图 1 可以看出,文中所述 GEBB 算法吞吐量性能随着信噪比的增加而逐步提升。当 UE 低移动速度时,普通 EBB 算法和 SVD 法两者吞吐量性能较为接近,而本文 GEBB 算法在高信噪比下较 EBB 与 SVD 法能获得较明显的吞吐量性能提升。以信噪比 24 dB 为例, GEBB 算法较 SVD 法能带来 3.5 Mb/s 的提升,究其原因可以认为,UE 低速时信道状态表现为平稳慢变的,对于 UE 移动速度较低的场景, GEBB 算法能够获得较为准确的误差自相关矩阵 Φ_E 信息来设计预编码矩阵,能够获得较好的波束成形与干扰抑制效果,因此,算法性能随着高信噪比的提高改善明显并且性能要优于 EBB 以及 SVD 分解法。

而对于 UE 移动速度较高的场景,由于信道 CSI 信息变化剧烈,使得信道估计误差较大。因此,一方面由信道误差 E 样本统计得到的 Φ_E 对提高波束指向性以及干扰的抑制作用变得有限, GEBB 与 EBB 算法性能相接近。另一方面,由于 GEBB 法以及 EBB 法采用大样本统计进行信道估计,算法性能表现出了较强的鲁棒特性,吞吐量性能要优于 SVD 分解法。以信噪比 24 dB 为例, GEBB 法以及 EBB 法能获得约 43 Mb/s 的吞吐速率,较 SVD 方法有 5.1 Mb/s 的性能改善。由仿真结果可以看出,本文 GEBB 算法在 UE 移动速率 3 km/h、30 km/h 场景下均能获得较为理想的系统性能。

5 结 论

在 TD-LTE 系统中,可以根据信道互易特性通过对数据信号做发送波束成形获得阵列增益。由于 TBF 技术需要发射机获得尽可能准确的信道状态信息,但在实际中,受干扰因素影响,获得的 CSI 信息通常是非理想的,而且是含有误差的,导致了 TD-LTE 波束成形算法处理性能的降低。以往学者的研究工作主要是围绕理想 CSI 下的波束成形算法展开研究,而本文针对非理想互易性下的下行波束成形算法设计问题展开研究,以最大化接收信号平均信干噪比做为目标函数,通过构造正则矩阵束,将最大化接收信干噪比的预编码矩阵求解问题转化为正则矩阵束的广义特征向量求解问题,使设计的权重矩阵既对准最大增益的波束方向又能有效抑制干扰,该预编码矩阵设计算法能够支持多流传输模式。计算机仿真验证了算法能够有效改善信道非理想互易性下的预编码处理增益。

需要指出的是,文中设计的波束成形算法需要已知信道互易误差 E 的统计自相关矩阵 Φ_E 。因此,结合 3GPP 协议标准讨论一种切实可行、准确、低代价的 Φ_E 获得策略可以作为下一步工作重点展开。

参考文献:

- [1] Jesus G, Jesus I, Jesus P. Beamforming-based emulation of spatial and temporal correlated MIMO channels [C]// Proceedings of 2012 IEEE International Symposium on Signals, Systems, and Electronics. Potsdam, Germany: IEEE, 2012; 1-4.
- [2] 贺中堂, 许苏晓, 徐冉, 等. 相关信道下 MIMO 信道容量优化算法的研究[J]. 信号处理, 2008, 24(3): 496-499.
HE Zhong-tang, XU Su-xiao, XU Ran, et al. On Capacity Optimization for Correlated MIMO Channels [J]. Signal Processing, 2008, 24(3): 496-499. (in Chinese)
- [3] LIU X, GAO F F, WANG G P, et al. Joint Beamforming and User Selection in Multicast Downlink Channel under Secrecy- Outage Constraint [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(1): 82-85.
- [4] LEE J, KIM Y, Lee H, et al. Coordinated Multipoint Transmission and Reception in LTE-Advanced Systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(11): 44-50.
- [5] 王凯蓉. 基于信道预测的时变 TDD_MIMO 信道互易性补偿方法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
WANG Kai-rong. Compensating Non-Reciprocity of Time-varying TDD-MIMO Channel Using Channel Prediction [D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
- [6] Patrick M, Gerhard P F. Coordinated Multi-Point on Mobile Communications from Theory to Practice [M]. New York: Cambridge University Press, 2011: 42-54.
- [7] Yogananda I, Ramesh A, Bhaskar D R. Performance Analysis of Transmit Beamforming for MISO Systems with Imperfect Feedback [J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(1): 222-231.
- [8] 李亚麟, 樊迅, 胡波, 等. 无线校准误差建模以对开环波束赋型技术的影响[J]. 电讯技术, 2010, 50(3): 45-48.
LI Ya-ling, FAN Xun, HU Bo, et al. Modeling of Antenna Calibration Error its Impact on Open-Loop Beamforming [J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(3): 45-48. (in Chinese)
- [9] 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, JIAN Zhi-ning. Impact of Non-ideal Channel Reciprocity on Beamforming [J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(1): 60-62. (in Chinese)
- [10] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 516-518.
ZHANG Xian-da. Matrix Analysis and Applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 516-

518. (in Chinese)

作者简介:



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.

Email: Zhenhao. Cai@alcatel-sbell. com. cn

陈文,男,1990年和1993年分别获武汉大学学士学位和硕士学位,1999年于日本国立电气通信大学获博士学位,现为上海交通大学电子工程系教授、博士生导师,主要从事网络编码、协作通信以及MIMO-OFDM等方向的研究,在IEEE杂志和会议等发表论文100余篇;

CHEN Wen received the B. S. degree and the M. S. degree from Wuhan University, and the Ph. D. degree from University of Electro-Communications, Tokyo, Japan in 1990, 1993 and 1999, respectively. Since 2006, he has been a full professor and Ph. D. supervisor in the Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiaotong University, China, where he is also the director of Institute for Signal Processing and Systems. His research concerns network coding, cooperative communications, cognitive radio, and MIMO-OFDM systems. He has published more than 100 papers in IEEE journals and conferences.

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,为国家科技重大专项课题负责人,目前在国内外期刊和会议共发表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 is now working on GSM/UMTS/LTE wireless communication systems research, design and development in Alcatel Lucent Shanghai Bell Co., Ltd. He is responsible for LTE commerce system design as a LTE system design manager. He has published more than 10 papers and applied for 10 patents.