

文章编号:1001-9081(2012)02-0381-04

doi:10.3724/SP.J.1087.2012.00381

# 一种多用户 MIMO 系统中有限反馈预编码算法及性能分析

曾 浩,袁昂飞\*,李正周

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400030)

(\*通信作者电子邮箱 angfeiyuan@163.com)

**摘要:**多用户多输入多输出(MIMO)系统中,用户可以通过反馈的方式把信道状态信息(CSI)传递给基站,基站利用该CSI进行预编码或者用户调度,可以有效地提取复用增益。但是传统的反馈方式,反馈量太大,占用过多上行资源。针对收发都是多天线条件的多用户MIMO系统,提出一种基于Grassmannian码本的有限反馈预编码方法,通过对用户信道矩阵进行量化,每个用户仅仅需要反馈一个序号而不是信道矩阵,从而大大减少了反馈量。通过对系统误码率(BER)和吞吐率的仿真,表明了该方法能保证系统性能。同时,由于信道估计存在误差,量化过程存在误差,所以,分析了信道矩阵误差对于新方法性能的影响,得到了系统吞吐率同信道矩阵误差的方差,以及基站发射功率三者的关系,并通过仿真进行验证,从而为评估信道估计和量化过程的优劣提供了理论依据。

**关键词:**多输入多输出;有限反馈;信道状态信息;信道矩阵误差;吞吐率

中图分类号: TN911.6 文献标志码:A

## New precoding algorithm with limited feedback and its performance analysis in multi-user MIMO systems

ZENG Hao, YUAN Ang-fei\*, LI Zheng-zhou

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** In multi-user MIMO (Multiple Input Multiple Output) system, the users transmit the Channel State Information (CSI) to the base station through feedback. Then the system could achieve the multiplexing gain through precoding or user scheduling with the received CSI at the base station. Concerning that the traditional way of feedback takes up too many uplink resources, a limited feedback MIMO precoding algorithm was proposed based on Grassmannian codebook. Only a few bits were required to be the feedback to the base station because the new approach quantized the channel matrix and transmitted the sequence number of the quantized channel matrix according to the codebook, which reduced the feedback load considerably. The simulation results of the Bit Error Rate (BER) and throughput rate show that the new approach maintains the performance of the system. Furthermore, the system throughput is illustrated on the condition that the estimated error and quantized error of the channel matrix exist. The analytic expression with the throughput, variance of error and transmitted power will benefit the channel estimation process.

**Key words:** Multiple Input Multiple Output (MIMO); limited feedback; Channel State Information (CSI); channel matrix error; throughput

## 0 引言

多用户多输入多输出( Multiple Input Multiple Output, MIMO)系统中,基站利用信道信息进行预编码或者用户调度,根据信道状况调整发射功率、改变调制和信道编码方式等,可以有效地提取复用增益,提高系统性能<sup>[1]</sup>。传统的将多个用户连同基站看作一个大的“虚拟 MIMO”,用户反馈全部信道状态信息(Channel State Information,CSI)的方法,从信息论角度来看,理论上可以完全消除用户间干扰,达到最大系统容量<sup>[2]</sup>,但是由于反馈全部CSI,使得该方法有很高的复杂度。文献[3]提出了基于矢量量化技术的有限反馈,它依靠传统的数据压缩技术,在一定程度上可以减少反馈量,文献[4-5]通过对信道质量进行度量,反馈信道的数学特性,比如协方差、秩等。但以上研究大都针对单用户点对点链路的,而对于多用户的研究多数假设用户为单天线,或者预编码为

分集方式而非复用方式。本文针对多用户MIMO系统,基站以获取复用增益为目的进行预编码,提出一种基于Grassmannian码本的有限反馈预编码方法,该方法对信道的子空间信息进行量化,仅仅反馈索引值信息<sup>[6]</sup>。同时,针对信道状态信息存在误差时的系统性能进行了分析,得到系统吞吐率、信道估计误差方差和发送功率之间的关系。本文最后通过对用户误码率(Bit Error Rate, BER)和吞吐率损失仿真,证明了所得结论。

## 1 完全反馈预编码算法

对于MIMO下行多用户系统,窄带平坦瑞利衰落信道,假设基站和用户都是多天线,天线个数分别为 $M, N$ ,用户总数为 $K$ ,基站总的发送功率为 $P$ ,第 $k$ 个用户的发送数据符号向量 $\mathbf{b}_k$ ,发送预编码矩阵 $\mathbf{T}_k$ ,则用户 $k$ 接收到的信号为:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k (\mathbf{T}_k \mathbf{b}_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{T}_i \mathbf{b}_i) + \mathbf{n}_k \quad (1)$$

收稿日期:2011-07-14;修回日期:2011-09-11。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61071191, CDJZR10160009)。

作者简介:曾浩(1977-),男,四川泸州人,副教授,博士,主要研究方向:无线通信、阵列信号处理; 袁昂飞(1984-),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向:MIMO技术; 李正周(1974-),男,重庆垫江人,副教授,博士,主要研究方向:信号检测、目标跟踪。

其中:  $\mathbf{H}_k$  是第  $k$  个用户信道矩阵, 其元素服从均值为 0、方差为 1 的复高斯分布;  $\mathbf{n}_k$  为方差为  $N_0$  的加性高斯白噪声向量。在多用户 MIMO 信道分解策略中<sup>[7-8]</sup>, 预编码矩阵  $\mathbf{T}_k$  满足:

$$\mathbf{H}_i \mathbf{T}_k = 0; \forall i \neq k \quad (2)$$

即  $\mathbf{T}_k$  为零空间集合  $\{\mathbf{N}(\mathbf{H}_i)\}$  的交集。为计算该预编码矩阵, 用户通过训练序列获取 CSI 后, 通过反馈链路反馈至基站。基站利用获得的每个用户的 CSI, 从而可以计算预编码矩阵  $\mathbf{T} = [\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_K]$ 。

首先, 基站通过用户  $k$  之外的用户 CSI 构建矩阵  $\mathbf{H}_k^-$ , 并进行奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD):

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_k^- &= [\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \dots, \mathbf{H}_{k-1}, \mathbf{H}_{k+1}, \dots, \mathbf{H}_K]^T = \\ &[\mathbf{U}_k^- \quad \bar{\mathbf{U}}_k^-] \begin{bmatrix} \Sigma_k^- & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} [\mathbf{V}_k^- \quad \bar{\mathbf{V}}_k^-]^H \end{aligned} \quad (3)$$

其中: 符号  $(\cdot)^H$  代表共轭转置, 且矩阵  $\bar{\mathbf{V}}_k^-$  的秩为

$$\text{rank}(\bar{\mathbf{V}}_k^-) = L = M - (K - 1)N \quad (4)$$

显然,  $M > (K - 1)N$ 。如果基站对于每个用户等功率分配, 可以取

$$\mathbf{T}_k = \bar{\mathbf{V}}_k^- \quad (5)$$

作为第  $k$  个用户预编码矩阵。因此, 当基站获取准确 CSI 时, 根据式(1), 多用户 MIMO 系统分解为  $K$  个独立的单用户系统, 此时第  $k$  个用户接收信号为

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{T}_k \mathbf{b}_k + \mathbf{n}_k \quad (6)$$

## 2 有限反馈预编码算法

### 2.1 无误差有限反馈

第 1 章介绍的传统预编码方法, 需要用户 CSI 的完整信息, 并需要用户反馈整个信道矩阵给基站。这种完全反馈准确 CSI 的方法反馈信息量大, 占用大量上行信道资源, 使移动终端实现困难, 而且加大了基站的数据处理量。在有限反馈系统与发送端具有完全 CSI 系统两种系统的吞吐率保持在一定差值的情况下, 为了保证有限反馈系统的空分复用增益, 引入了信道估计误差, 并在下文分析了信道估计误差对系统吞吐率损失的影响。下面首先介绍无误差有限反馈。

由于第  $k$  个用户的信道矩阵  $\mathbf{H}_k$  的 SVD 可以表示为:

$$\mathbf{H}_k = [\mathbf{U}_k \quad \bar{\mathbf{U}}_k] [\Sigma_k \quad 0] [\mathbf{V}_k \quad \bar{\mathbf{V}}_k]^H \quad (7)$$

$\mathbf{V}_k$  为  $\mathbf{H}_k$  行空间的正交基。根据式(7), 式(3) 可以改写为:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_k^- &= [\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \dots, \mathbf{H}_{k-1}, \mathbf{H}_{k+1}, \dots, \mathbf{H}_K]^T = \\ &[\mathbf{U}_1 \Sigma_1 \mathbf{V}_1^H, \mathbf{U}_2 \Sigma_2 \mathbf{V}_2^H, \dots, \mathbf{U}_{k-1} \Sigma_{k-1} \mathbf{V}_{k-1}^H, \\ &\mathbf{U}_{k+1} \Sigma_{k+1} \mathbf{V}_{k+1}^H, \dots, \mathbf{U}_K \Sigma_K \mathbf{V}_K^H]^T = \\ &\text{diag}(\mathbf{U}_1 \Sigma_1, \mathbf{U}_2 \Sigma_2, \dots, \mathbf{U}_{k-1} \Sigma_{k-1}, \mathbf{U}_{k+1} \Sigma_{k+1}, \dots, \\ &\mathbf{U}_K \Sigma_K) [\mathbf{V}_1^H, \mathbf{V}_2^H, \dots, \mathbf{V}_{k-1}^H, \mathbf{V}_{k+1}^H, \dots, \mathbf{V}_K^H]^T \end{aligned} \quad (8)$$

记

$$\mathbf{V}_k^- = [\mathbf{V}_1 \quad \mathbf{V}_2 \quad \dots \quad \mathbf{V}_{k-1} \quad \mathbf{V}_{k+1} \quad \dots \quad \mathbf{V}_K]^H \quad (9)$$

可以看出  $\mathbf{H}_k^-$  与  $\mathbf{V}_k^-$  有相同的零空间, 从而  $\mathbf{T}_k$  也为  $\mathbf{V}_k^-$  的零空间正交基。用户只需要反馈  $\mathbf{V}_k^-$  而不是  $\mathbf{H}_k$ , 同样可以计算出预编码矩阵。

为了进一步减少反馈量, 用户  $k$  估计出信道矩阵  $\mathbf{H}_k$  后, 将计算得到的信道子空间信息  $\mathbf{V}_k$  进行量化得到矩阵  $\hat{\mathbf{V}}_k$ , 然后再反馈  $\hat{\mathbf{V}}_k$  给基站。

量化反馈过程首先建立一个量化码本如下:

$$\mathbf{C} = \{\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_{2^B}\} \quad (10)$$

具体建立方法可采用 Grassmannian 码本设计准则<sup>[9-11]</sup> 得到,

码本中的码字  $\mathbf{C}_i$  满足

$$\begin{cases} \mathbf{C}_i \in \mathbb{C}^{M \times N} \\ \mathbf{C}_i \mathbf{C}_i^H = \mathbf{I} \end{cases} \quad (11)$$

其中:  $i = 1, 2, \dots, 2^B$ ,  $2^B$  为码本集合的长度, 长度越大, 量化值越精确;  $\mathbf{I}$  为单位矩阵。然后, 按照如下准则进行量化, 即

$$\hat{\mathbf{V}}_k = \arg \min_{\mathbf{C} = \mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_{2^B}} \|\mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^H - \mathbf{C}_i \mathbf{C}_i^H\|_2 \quad (12)$$

量化后, 假设

$$\hat{\mathbf{V}}_k = \mathbf{C}_l \quad (13)$$

显然,  $l = 1, 2, \dots, 2^B$ 。最后, 由于基站和用户所采用的码本相同, 用户仅仅需要反馈量化码字的序号  $l$  给基站, 即仅仅反馈  $B$  比特信息。然而一个  $N \times M$  的信道矩阵, 假设每个实数采用  $Q$  比特量化, 则要反馈的信息量为  $2NMQ$  比特, 以一个  $4 \times 8$  系统为例, 反馈全部信道信息需要 64 个实值参数。

基站根据接收到的所有  $K$  个用户的反馈码字序号, 在本地码本中搜索各用户的量化码字, 从而构建矩阵如下:

$$\hat{\mathbf{V}}_k = [\hat{\mathbf{V}}_1 \quad \hat{\mathbf{V}}_2 \quad \dots \quad \hat{\mathbf{V}}_{k-1} \quad \hat{\mathbf{V}}_{k+1} \quad \dots \quad \hat{\mathbf{V}}_K]^H \quad (14)$$

由于式(14) 中  $\hat{\mathbf{V}}_k$  为式(9) 中  $\mathbf{V}_k^-$  的量化值, 二者零空间相同, 基站得到的预编码矩阵为:

$$\mathbf{T}_k = \hat{\mathbf{V}}_k \quad (15)$$

其中,  $\hat{\mathbf{V}}_k$  表示  $\hat{\mathbf{V}}_k$  零空间正交基。由式(1), 用户  $k$  接收信号为

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{V}}_k \mathbf{b}_k + \mathbf{H}_k \sum_{i=1, i \neq k}^K \hat{\mathbf{V}}_i \mathbf{b}_i + \mathbf{n}_k \quad (16)$$

根据上述分析, 每个用户在进行信道反馈时, 仅仅需要反馈一个  $B$  比特的数据, 而不是一个矩阵, 反馈量大大减少。总结该有限反馈算法的步骤如下:

- 1) 用户  $k$  估计信道状态信息, 得到  $\mathbf{H}_k$ ;
- 2) 计算得到信道子空间信息  $\mathbf{V}_k$ , 并将其量化为码本中对应码字, 得到  $\hat{\mathbf{V}}_k$ ;
- 3) 用户反馈  $B$  比特量化码字序号直至基站;
- 4) 基站据此搜索本地码本  $\mathbf{C}$ , 根据式(14) 计算预编码矩阵。

### 2.2 信道矩阵存在误差条件有限反馈系统

式(15) 得到了预编码矩阵, 同式(5) 相比, 由于量化过程中存在误差, 其预编码性能会有所降低。同时, 由于信道 CSI 是通过估计得到的, 估计误差也同样存在。假设用户  $k$  量化后的信道矩阵表示为  $\tilde{\mathbf{H}}_k$ , 则

$$\mathbf{H}_k = \tilde{\mathbf{H}}_k + \mathbf{E}_k \quad (17)$$

其中:  $\mathbf{E}_k$  为信道矩阵的误差, 包括了估计误差和量化误差, 矩阵中每个元素服从方差为  $\sigma_e^2$  的零均值复高斯分布, 且  $0 < \sigma_e^2 < 1$ , 显然,  $\sigma_e^2$  反映信道估计性能的好坏。根据式(17),  $\tilde{\mathbf{H}}_k$  服从方差为  $1 - \sigma_e^2$  的零均值复高斯分布,  $\mathbf{E}_k$  与  $\tilde{\mathbf{H}}_k$  相互独立。记  $\tilde{\mathbf{V}}_k$  为  $\tilde{\mathbf{H}}_k$  通过 SVD 得到的行空间的正交基, 按照式(12) 量化, 得到  $\hat{\tilde{\mathbf{V}}}_k$ , 由有限反馈算法的步骤 4) 得到

$$\hat{\tilde{\mathbf{V}}}_k = [\hat{\tilde{\mathbf{V}}}_1 \quad \hat{\tilde{\mathbf{V}}}_2 \quad \dots \quad \hat{\tilde{\mathbf{V}}}_{k-1} \quad \hat{\tilde{\mathbf{V}}}_{k+1} \quad \dots \quad \hat{\tilde{\mathbf{V}}}_K]^H \quad (18)$$

用  $\tilde{\mathbf{V}}_k$  表示  $\hat{\tilde{\mathbf{V}}}_k$  的零空间正交基, 得到的预编码矩阵表示为

$$\tilde{\mathbf{T}}_k = \tilde{\mathbf{V}}_k; k = 1, 2, \dots, K \quad (19)$$

其中

$$\tilde{\mathbf{V}}_k = \overline{\mathbf{V}}_k^- + \hat{E}_k \quad (20)$$

$\hat{E}_k$  为信道估计误差和量化误差之和, 此时, 考虑码本足够长, 量化误差可以忽略的情况。用户  $k$  的接收信号为

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_k &= \mathbf{H}_k \tilde{\mathbf{T}}_k \mathbf{b}_k + \mathbf{H}_k \sum_{i=1, i \neq k}^K \tilde{\mathbf{T}}_i \mathbf{b}_i + \mathbf{n}_k = \\ &\mathbf{H}_k \tilde{\mathbf{V}}_k \mathbf{b}_k + \mathbf{H}_k \sum_{i=1, i \neq k}^K \tilde{\mathbf{V}}_i \mathbf{b}_i + \mathbf{n}_k \end{aligned} \quad (21)$$

其中:  $\mathbf{H}_k \tilde{\mathbf{V}}_k \mathbf{b}_k$  为用户期望信号, 包含信道估计误差;  $\mathbf{H}_k \sum_{i=1, i \neq k}^K \tilde{\mathbf{V}}_i \mathbf{b}_i$

$\tilde{\mathbf{V}}_i \mathbf{b}_i$  为由于信道估计误差造成的用户间干扰。二者均造成系统性能下降, 下文将对此进行分析。

### 3 基于吞吐率的性能分析

以用户  $k$  为例, 假设基站获得准确信道信息, 由于用户间的干扰完全消除, 用户  $k$  在具有完善信道信息下的吞吐率为<sup>[12]</sup>

$$R = E[\ln \det(\mathbf{I}_N + \rho \mathbf{H}_k \mathbf{T}_k (\mathbf{H}_k^\text{H} \mathbf{T}_k^\text{H}))] \quad (22)$$

其中

$$\rho = P/MN_0 \quad (23)$$

存在信道估计误差的有限反馈系统, 用户的吞吐率为

$$\begin{aligned} \hat{R} &= E[\ln \det(\mathbf{I}_N + SINR)] = \\ &E\left[\ln \det\left(\mathbf{I}_N + \frac{\rho \mathbf{H}_k \tilde{\mathbf{T}}_k (\mathbf{H}_k^\text{H} \tilde{\mathbf{T}}_k^\text{H})}{\mathbf{I}_N + \rho \mathbf{H}_k \sum_{i=1, i \neq k}^K (\tilde{\mathbf{T}}_i \tilde{\mathbf{T}}_i^\text{H}) \mathbf{H}_k^\text{H}}\right)\right] \end{aligned} \quad (24)$$

其中  $SINR$  (Signal to Interface and Noise Rate) 是信干噪比, 表示信号与干扰和噪声的功率比值。

由于信道估计误差的存在, 用户间干扰不能完全消除。所以由于信道估计误差导致的用户  $k$  吞吐率与理想值之差为  $\Delta R = R - \hat{R}$ , 将式(22)~(24) 代入该式化简得:

$$\begin{aligned} \Delta R &= E[\ln \det(\mathbf{I}_N + \rho \mathbf{H}_k \mathbf{T}_k (\mathbf{H}_k^\text{H} \mathbf{T}_k^\text{H}))] - \\ &E\left[\ln \det\left(\mathbf{I}_N + \rho \mathbf{H}_k \sum_{i=1, i \neq k}^K (\tilde{\mathbf{T}}_i \tilde{\mathbf{T}}_i^\text{H}) \mathbf{H}_k^\text{H} + \rho \mathbf{H}_k \tilde{\mathbf{T}}_k (\mathbf{H}_k^\text{H} \tilde{\mathbf{T}}_k^\text{H})\right)\right] + \\ &E\left[\ln \det\left(\mathbf{I}_N + \rho \mathbf{H}_k \sum_{i=1, i \neq k}^K (\tilde{\mathbf{T}}_i \tilde{\mathbf{T}}_i^\text{H}) \mathbf{H}_k^\text{H}\right)\right] \end{aligned} \quad (25)$$

由于

$$\begin{aligned} E[\ln \det(\mathbf{I}_N + \rho \mathbf{H}_k \mathbf{T}_k (\mathbf{H}_k^\text{H} \mathbf{T}_k^\text{H}))] &\leq \\ E\left[\ln \det\left(\mathbf{I}_N + \rho \mathbf{H}_k \sum_{i=1, i \neq k}^K ((\tilde{\mathbf{T}}_i \tilde{\mathbf{T}}_i^\text{H}) \mathbf{H}_k^\text{H}) + \rho \mathbf{H}_k \tilde{\mathbf{T}}_k (\mathbf{H}_k^\text{H} \tilde{\mathbf{T}}_k^\text{H})\right)\right] & \end{aligned} \quad (26)$$

$$\Delta R \leq E\left[\ln \det\left(\mathbf{I}_N + \rho \mathbf{H}_k \sum_{i=1, i \neq k}^K (\tilde{\mathbf{T}}_i \tilde{\mathbf{T}}_i^\text{H}) \mathbf{H}_k^\text{H}\right)\right] \quad (27)$$

由 Jensen 不等式可得:

$$\begin{aligned} E\left[\ln \det\left(\mathbf{I}_N + \rho \mathbf{H}_k \sum_{i=1, i \neq k}^K (\tilde{\mathbf{T}}_i \tilde{\mathbf{T}}_i^\text{H}) \mathbf{H}_k^\text{H}\right)\right] &\leq \\ \ln \det\left(\mathbf{I}_N + \rho E\left[\mathbf{H}_k \sum_{i=1, i \neq k}^K (\tilde{\mathbf{T}}_i \tilde{\mathbf{T}}_i^\text{H}) \mathbf{H}_k^\text{H}\right]\right) & \end{aligned} \quad (28)$$

$$\Delta R \leq E\left[\ln \det\left(\mathbf{I}_N + \rho \mathbf{H}_k \sum_{i=1, i \neq k}^K (\tilde{\mathbf{T}}_i \tilde{\mathbf{T}}_i^\text{H}) \mathbf{H}_k^\text{H}\right)\right] =$$

$$\ln \det\{\mathbf{I}_N + (K-1)\rho E[(\mathbf{H}_k (\tilde{\mathbf{T}}_i \tilde{\mathbf{T}}_i^\text{H}) \mathbf{H}_k^\text{H})]\} \quad (29)$$

将式(17) 代入式(29), 在码本足够长时, 量化误差可以忽略, 此时,

$$E[(\mathbf{H}_k (\tilde{\mathbf{T}}_i \tilde{\mathbf{T}}_i^\text{H}) \mathbf{H}_k^\text{H})] = E[(\mathbf{E}_k (\tilde{\mathbf{T}}_i \tilde{\mathbf{T}}_i^\text{H}) \mathbf{E}_k^\text{H})] \quad (30)$$

由于

$$E[(\mathbf{E}_k (\tilde{\mathbf{T}}_i \tilde{\mathbf{T}}_i^\text{H}) \mathbf{E}_k^\text{H})] = \sigma_e^2 \quad (31)$$

化简得到

$$\Delta R \leq \ln \det\{\mathbf{I}_N + (K-1)\rho \sigma_e^2 \mathbf{I}_N\} \quad (32)$$

将式(23) 代入(32) 得到:

$$\max \Delta R = \ln \det\left\{\mathbf{I}_N + \frac{P(K-1)}{MN_0} \sigma_e^2 \mathbf{I}_N\right\} \quad (33)$$

可以看出  $\sigma_e^2 = 0$  时,  $\max \Delta R = 0$ , 无吞吐率损失, 若使系统保持固有的复用增益, 即使得最大吞吐率损失保持定值, 假设每个用户最大吞吐率损失为  $\alpha$ , 则由式(29) 可得:

$$\ln \det\left\{\mathbf{I}_N + \frac{P(K-1)}{MN_0} \sigma_e^2 \mathbf{I}_N\right\} = 2^\alpha \quad (34)$$

求得信道估计误差如下:

$$\sigma_e^2 = (2^\alpha - 1) \frac{MN_0}{P(K-1)} \quad (35)$$

式(35) 反映了存在信道估计误差的有限反馈系统保持固有复用增益条件下, 对信道估计性能的要求。

### 4 仿真及分析

仿真中假设  $M = 8, N = 2, K = 4$ , 单个用户最大吞吐率损失  $\alpha = 1$  bps/Hz, 系统无量化误差。图 1 描述了用户全反馈准确 CSI 与采用 2.1 节算法有限反馈相比, 系统误码率的比较。可以看出, 两种反馈方式误码率相近, 性能相当, 而由 2.1 节算法可知, 反馈信道子空间信息可以大大减少反馈比特数。

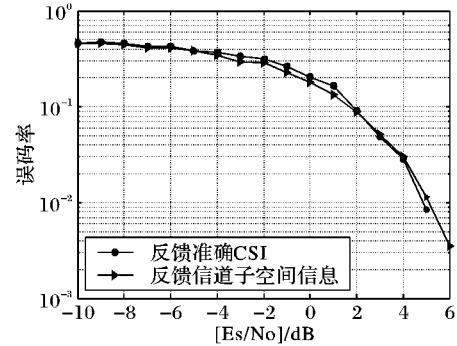
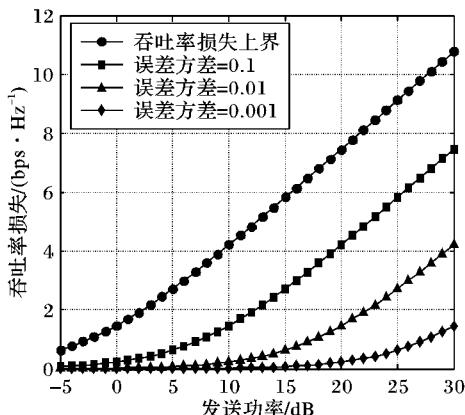


图 1 有限反馈与全反馈准确 CSI 性能比较

图 2 所示为不同信道估计误差条件下用户吞吐率损失随发送功率的变化关系, 当  $\sigma_e^2 = 1$  时, 由式(28) 得到吞吐率损失的上界。可以看出发送功率一定时, 信道估计误差方差越大, 越靠近吞吐率损失上界, 当信道估计误差一定时, 随着基站发送功率的增大, 用户吞吐率损失越大, 对信道估计精度要求越高, 与理论推导相符。

### 5 结语

针对多用户 MIMO 有限反馈系统, 提出一种预编码方法, 通过反馈信道子空间信息减少反馈比特数, 并且不降低系统性能; 重点分析了信道估计误差对系统的影响, 推导单个用户的最大吞吐率损失; 在此基础上推导了一定吞吐率损失下信道估计误差方差和发送功率的关系, 得出不同信道估计误差方差下发送功率与吞吐率损失之间的关系; 最后通过仿真验证了以上结论。

图 2 不同误差方差  $\sigma_e^2$  下的发送功率和吞吐率损失的关系

## 参考文献:

- [1] PARK J, SONG E, SUNG W. Capacity analysis for distributed antenna systems using cooperative transmission schemes in fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8 (2): 586 – 592.
- [2] ANNAPUREDDY V S, VEERAVALLI V V. Sum capacity of MIMO interference channels in the low interference regime [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(5): 2565 – 2581.
- [3] AU-YEUNG C K, LOVE D J, SANAYEI S. Trellis coded line packing: large dimensional beamforming vector quantization and feedback transmission [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(6): 1844 – 1853.
- [4] YU XIANG, WANG HAIQUAN, YANG EN-HUI. Design and analysis of optimal noisy channel quantization with random index assignment [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(1): 1 – 11.

(上接第 373 页)

KNX/EIB-S 下传输延迟时间小于 2 s 的数据命令帧占全部检测数据命令帧的百分比为 73.4%; KNX/EIB-A 下传输延迟时间小于 2 s 的数据命令帧占全部检测数据命令帧的百分比为 91.5%。在 KNX/EIB 应用场合, 数据命令帧最合理的传输延迟时间应当小于 2 s, 可见 KNX/EIB-A 大幅度提高了合理延迟占总数的百分比。

## 5 结语

KNX/EIB-A 在不改变原有 KNX/EIB 通信协议的基础上, 通过调度 BCU 数据命令帧发送, 减轻了 KNX/EIB 网络传输时延抖动, 从而达到改善 KNX/EIB 网络通信协议实时性能的目的。分析证明了 KNX/EIB-A 的可行性, 设备原型的实现、数据的测量分析进一步证明了 KNX/EIB-A 在一定程度上弥补了 KNX/EIB 通信协议在实时性上的不足。

## 参考文献:

- [1] 刘枫, 潘东波. HBES 标准对楼宇自动化的影响及其未来的发展趋势 [J]. 中国仪器仪表, 2008(1): 28 – 33.
- [2] ZHU JIAPING, TAO ZHENGSHU, LV CHUNFENG. Delay analysis for IEEE 802.15.4 CSMA/CA scheme with heterogeneous buffered traffic [C]// ICMTMA 2011: Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2011, 1: 835 – 845.
- [3] KNX Association. System specifications communication media twisted: Pair 1[S]. KNX, 2009.
- [4] 袁远, 李红信. CAN 网络实时性分析及改进 [J]. 电子设计工程, 2010, 18(6): 110 – 112.

5796 – 5804.

- [5] TRIVELLATO M, BOCCARDI F, HUANG H. On transceiver design and channel quantization for downlink multiuser MIMO systems with limited feedback [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(8): 1494 – 1504.
- [6] KIM T, CLERCKX B, LOVE D J, et al. Limited feedback beamforming systems for dual-polarized MIMO channel [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 11(9): 1 – 15.
- [7] FARHANG-BOROUJENY B, SPENCER Q, SWINDLEHURST L. Layering techniques for space-time communication in multi-user networks [C]// VTC 2003-Fall: 2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE, 2003, 2: 1339 – 1342.
- [8] SPENCER Q, SWINDLEHURST L, HAARD M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(2): 461 – 471.
- [9] LOVE D J, ROBERT W H, STROHME T. Grassmannian beamforming for multiple-input multiple-output wireless systems [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(10): 2735 – 2746.
- [10] LOVE D J, HEATH R W. Limited feedback unitary precoding for spatial multiplexing systems [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(8): 2967 – 2976.
- [11] CHENG Y. A scalable limited feedback design for network MIMO using per-cell product codebook [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(10): 3093 – 3099.
- [12] JINDAL N. MIMO broadcast channels with finite-rate feedback [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(11): 5045 – 5060.
- [13] KAISER J, BRUDNA C, MITIDIERI C. A real-time event channel model for the CAN-bus [C]// Proceedings of International Parallel and Distributed Processing Symposium. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2003: 8.
- [14] BAOWEI HUA, ZHANG HAO, LI HUI, et al. Analysis and research on the real-time performance of profibus fieldbus [C]// WCSE '09: WRI World Congress on Software Engineering. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 136 – 140.
- [15] TOVAR E, VASQUES F. Scheduling real-time communications with P-NET [C]// IEE Colloquium on Real-time Systems: Digest No. 1998/306. Piscataway: IEEE, 1998: 9/1 – 9/5.
- [16] ALMEIDA L, TOVAR E, FONSECA J A G, et al. Schedulability analysis of real-time traffic in WorldFIP networks: An integrated approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49 (5): 1165 – 1174.
- [17] TOVAR E, VASQUES F. Distributed computing for the factory floor: A realtime approach using WorldFIP networks [J]. Computers in Industry, 2000, 44(1): 11 – 30.
- [18] LIAO CHENG-LIN, WANG LI-FANG, WU YAN. Real-time and reliability analysis of FlexRay bus [C]// APPEEC 2010: Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Piscataway: IEEE, 2010: 1 – 4.
- [19] 刘怀, 黄建新, 曹戈. 基于令牌总线的网络控制系统中信息的优化调度 [C]// 第 26 届中国控制会议论文集. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007: 288 – 291.
- [20] 颜新春, 李文涛, 王凤英. 基于令牌总线和工业以太网的控制系统 [J]. 自动化仪表, 2008, 29(1): 40 – 46.
- [21] 刘怀, 黄建. 基于令牌控制总线网络的实时信息调度算法 [J]. 微计算机信息, 2008, 24(18): 102 – 104.