

## 一种多输入多输出系统中有限反馈预编码的自适应跟踪测度

黄海洋 武刚 方晓胤 吴琪 李少谦  
(电子科技大学通信抗干扰技术国家重点实验室 成都 610054)

**摘要:** 该文提出一种新的适用于无线相关信道中有限反馈预编码多输入多输出系统的预编码矩阵自适应跟踪测度。由于该测度在统计意义下对信道的相关性与预编码矩阵变化的关系具有更优化的描述,所以基于该测度的方案在保持较低反馈信息量的前提下,能够进一步改善预编码系统性能。文中给出优化自适应跟踪测度的理论推导。系统仿真分别针对无线信道的频域相关和时域相关,并结合空间分集和空间复用两类系统结构予以讨论,并验证了理论分析结果。另外,由于该测度方案算法复杂度更低,所以更具工程实用价值。

**关键词:** 无线通信; 多输入多输出; 预编码; 有限反馈; 自适应跟踪

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)05-1082-04

## An Adaptive Tracking Metric for Finite Feedback Precoding in MIMO Systems

Huang Hai-yang Wu Gang Fang Xiao-yin Wu Qi Li Shao-qian

(Key Lab. of Commun., University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** This paper proposes a novel adaptive tracking metric for precoding matrices in finite feedback precoding MIMO systems with wireless correlated channels. From the statistical point of view, this metric has an optimal property to describe the relationship of channel correlation and the changes of precoding matrices. Therefore, based on keeping low amount of feedback data, this metric scheme improves further the precoding system performance. The derivation of the optimal adaptive tracking metric is given. System simulations aim at the correlations in frequency and temporal domains of wireless channels, which are combined with spatial diversity and multiplexing system structures. The theoretical analysis conclusion is verified by these results. In addition, for the lower complexity of this metric scheme, it is more valuable in practice.

**Key words:** Wireless communications; MIMO; Precoding; Finite feedback; Adaptive tracking

### 1 引言

多输入多输出(MIMO)系统可以利用空间资源来为无线通信网络提供更高的数据率和更可靠的通信质量。研究发现,若发射机端获得信道状态信息(CSI),则可以依靠预编码方法进一步提高系统的综合性能<sup>[1]</sup>,其中,线性类预编码方法<sup>[2]</sup>相对于非线性类可以保证更低复杂度的系统设计。简单地说,预编码就是在闭环系统的发射机端对信号进行预畸变处理来对抗衰落信道对信号传送的影响。然而在实际系统中,反馈链路将面临信号的数据量、时延和传输差错等问题的影响。其中,数据量成为这些相互关联因素的核心问题。因此,近期研究在这方面展开了广泛讨论<sup>[2-6]</sup>。这些思想主要包括:对瞬时信道信息的直接量化;利用信道统计信息来降低反馈数据率;以及利用部分信道信息或码本量化方式进

行有效压缩数据量。本文就码本量化类方法予以讨论。

近年多载波技术的发展,特别是和MIMO技术的结合给无线通信系统的性能提升带来更大的潜力,其中最典型的就是多输入多输出-正交频分复用(MIMO-OFDM)技术。对于多天线多载波系统,闭环结构的反馈数据量会随载波数呈线性增长。因此,有限反馈方法将面临更加严峻的挑战。如何在反馈量和性能之间找到最佳折衷点正是我们关心的问题。目前有3类解决方案<sup>[7-9]</sup>:第1类是分簇(clustering),即将载波划分成若干簇,簇内具有较强的频率相关性,将由导频点得到的预编码矩阵在该簇其它载频点上进行共享;第2类方案是利用所有导频点处的预编码矩阵进行内插(interpolation)处理,以获取其它载频点对应的预编码矩阵;第3类方案是利用某一个导频点处得到的预编码矩阵和载波簇的频域相关性来做其它载波簇对应的预编码矩阵的自适应跟踪(tracking)。简单地说,分簇是基本方案,内插以复杂度提高为代价换得一定的性能提升,而自适应跟踪方案追求更小的反馈数据率并以尽量少的性能损失为代价。本文针对第3类方案进行深入讨论。

2008-03-17收到,2008-12-08改回

国家自然科学基金(60496313),国家973计划项目课题(2007CB310604)和NTT DoCoMo(北京)通信技术研究中心有限公司资助课题

在文献[7]中, Zhang 根据信道的频率响应在邻接载频点的相关特性, 提出在频率选择性衰落信道中对应于邻接子载波的优化预编码矩阵应该位于超维的 Grassmann 流形的某个较小的邻接区域中, 并指出这个区域的元素关系应由 chord 距离来描述。该方法在损失较小的性能情况下, 降低了反馈信息量。由于各个载频点的优化预编码矩阵应该与该载频点的信道信息相匹配, 而不同载频点的信道矩阵的相关性并非是由 chord 距离准确描述, 这使得我们进一步深入研究, 发现并推导出矩阵 Euclid 距离是更加优化的自适应跟踪的决策测度。它在保持反馈量不变的情况下, 能进一步降低系统性能损失。系统仿真从信道的频域相关和时域相关两种情况并结合空间分集和复用两种结构<sup>[10]</sup>验证了分析结果。

## 2 系统模型

假设系统发射天线数为  $M_t$ , 接收天线数为  $M_r$ , 载波数为  $C$ , 则载频点  $c$  上的基带接收信号可以表达成

$$\mathbf{r}_c = \mathbf{H}_c \mathbf{F}_c \mathbf{T}_c + \mathbf{Z}_c \quad (1)$$

其中预编码矩阵  $\mathbf{F}_c$  是来自于预先设计好的码本空间  $\mathcal{F}$ ,  $\mathbf{H}_c$  表示信道状态信息矩阵, 其独立同分布的元素满足  $\mathcal{CN}(0,1)$  分布,  $\mathbf{T}_c$  为空时编码后的生成信号矩阵, 而  $\mathbf{Z}_c$  中的元素是独立同分布的复数白高斯噪声, 满足  $\mathcal{CN}(0, N_0)$  分布。关于单载波系统中 Grassmann 预编码有限反馈方法的基础内容包括码本空间的生成方法可以参看文献[3,4], 本文不再赘述。

为便于理解, 现将预编码矩阵的自适应跟踪在 MIMO-OFDM 系统中的基本操作步骤描述如下, 如图 1 所示。不失一般性地, 这里假设载波总数为 16, 平均分成 4 个簇, 每个簇包含 4 个子载波。图 1 中的数字代表操作顺序的序号。首先通过信道估计器估计出簇(a)的导频点上的信道状态信息。为了保证初始精度, 在预生成好的全码本空间  $\mathcal{F}$  中寻找其对应的预编码矩阵。由于载波间的相关性, 该簇中的其它频点也共享该预编码矩阵。然后利用它去跟踪下一个簇的第 1 个频点所对应的预编码矩阵。根据载波簇间的频率相关性, 利用某种合理的测度距离可以缩小码本空间的范围, 以此在极少性能损失的情况下实现进一步减少反馈信息量的目的, 并将跟踪到的预编码矩阵共享于簇(b)的其它频点。依此完成所有频点的操作。

## 3 自适应跟踪决策测度

Zhang 认为这个测度应该由 chord 距离(属于 geodesic 距离中的一种)来描述<sup>[7]</sup>。由于从平均误符号率角度来看, 等效信道矩阵的 F 范数(Frobenius norm)大小的增加将有助于系统性能的提升<sup>[10]</sup>, 所以在已知前一个簇的优化预编码

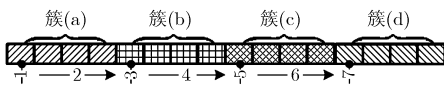


图 1 预编码矩阵自适应跟踪步骤示意图

矩阵  $\mathbf{F}_a$  的条件下, 需要在尽量准确的缩小范围的码本空间中寻找本簇的优化预编码矩阵, 使得

$$\|\mathbf{H}_b \mathbf{F}_{\text{opt}}\|_F \leftarrow \underset{\mathbf{F}_b \in \mathcal{F}' \subset \mathcal{F}}{\geq} \|\mathbf{H}_b \mathbf{F}_b\|_F, \quad (2)$$

其中  $\mathbf{F}_{\text{opt}}$  是本簇理论上的最优预编码矩阵,  $x \leftarrow \underset{y}{\geq} y$  表示  $x \geq y$  并希望  $y$  尽量接近  $x$ 。从频域相关性观点看, 相邻两个载波簇的信道状态信息非常“接近”。这样本簇的优化预编码矩阵  $\mathbf{F}_b$  与前一个簇的预编码矩阵  $\mathbf{F}_a$  很可能在某种测度距离上“邻近”。简单地说, 就是用相邻载波簇的信道状态信息矩阵的相关关系来确定其对应的优化预编码矩阵间的相关关系, 并以此缩小备选码本空间, 实现高效的自适应跟踪。

因为载波簇间的信道信息相关性是一个统计意义上的概念, 所以在时间样本上并没有绝对准确的关系。但经验上, 描述该相关性的测度并不是 chord 距离。这引发我们进一步思考, 发现利用矩阵 Euclid 距离可以带来更加优化的系统性能。在理论推导前首先给出 Grassmann 码本矩阵的性质, 由于  $\mathbf{F}_i$  的行数大于列数且是准酉的(semi-unitary), 即  $\mathbf{F}_i^H \mathbf{F}_i = \mathbf{I}_M$ , 其中  $[\cdot]^H$  表示共轭转置变换, 有

$$\left. \begin{aligned} \|\mathbf{F}_i\|_F &= \sqrt{\text{tr}(\mathbf{F}_i^H \mathbf{F}_i)} = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{I}_M)} = \sqrt{M} \\ \|\mathbf{F}_i \mathbf{F}_i^H\|_F &= \sqrt{\text{tr}(\mathbf{F}_i \mathbf{F}_i^H \mathbf{F}_i \mathbf{F}_i^H)} = \sqrt{M} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

矩阵 Euclid 距离  $d_{\text{ME}}$  和 chord 距离  $d_{\text{chord}}$  的关系如下

$$\begin{aligned} \|\mathbf{F}_1 \mathbf{F}_1^H - \mathbf{F}_2 \mathbf{F}_2^H\|_F &= \left\| (\mathbf{F}_1 - \mathbf{F}_2) \mathbf{F}_1^H + \mathbf{F}_2 (\mathbf{F}_1^H - \mathbf{F}_2^H) \right\|_F \\ &\leq \|\mathbf{F}_1 - \mathbf{F}_2\|_F \cdot \|\mathbf{F}_1^H\|_F + \|\mathbf{F}_2\|_F \cdot \|\mathbf{F}_1^H - \mathbf{F}_2^H\|_F \\ &= 2\sqrt{M} \cdot \|\mathbf{F}_1 - \mathbf{F}_2\|_F \end{aligned} \quad (4)$$

所以

$$\begin{aligned} d_{\text{chord}} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \|\mathbf{F}_1 \mathbf{F}_1^H - \mathbf{F}_2 \mathbf{F}_2^H\|_F \leq \sqrt{2M} \|\mathbf{F}_1 - \mathbf{F}_2\|_F \\ &= \sqrt{2M} d_{\text{ME}} \end{aligned} \quad (5)$$

下面证明矩阵 Euclid 距离  $d_{\text{ME}} = \|\mathbf{F}_1 - \mathbf{F}_2\|_F$  相对于 chord 距离具有更加优化的性能。目标函数如下

$$\mathbf{F}_2 = \arg \min_{\mathbf{F}_2 \in \mathcal{F}} \left| \|\mathbf{H}_2 \mathbf{F}_{\text{opt}}\|_F - \|\mathbf{H}_2 \mathbf{F}_2\|_F \right| \quad (6)$$

**证明** 由矩阵范数相关理论<sup>[11]</sup>有

$$\begin{aligned} \left| \|\mathbf{H}_2 \mathbf{F}_{\text{opt}}\|_F - \|\mathbf{H}_2 \mathbf{F}_2\|_F \right| &\leq \|\mathbf{H}_2 \mathbf{F}_{\text{opt}} - \mathbf{H}_2 \mathbf{F}_2\|_F \\ &\leq \|\mathbf{H}_1 \mathbf{F}_1 - \mathbf{H}_2 \mathbf{F}_2\|_F + \|\mathbf{H}_2 \mathbf{F}_{\text{opt}} - \mathbf{H}_1 \mathbf{F}_1\|_F \end{aligned}$$

且

$$\begin{aligned} \|\mathbf{H}_1 \mathbf{F}_1 - \mathbf{H}_2 \mathbf{F}_2\|_F &= \|\mathbf{H}_1 \mathbf{F}_1 \mathbf{F}_1^H \mathbf{F}_1 - \mathbf{H}_2 \mathbf{F}_2 \mathbf{F}_2^H \mathbf{F}_2\|_F \\ &\leq \sqrt{M} \left( \|\mathbf{H}_1\|_F (\sqrt{2} d_{\text{chord}} + d_{\text{ME}}) + \|\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2\|_F \right) \\ &\leq \sqrt{M} \left( (2\sqrt{M} + 1) d_{\text{ME}} \|\mathbf{H}_1\|_F + \|\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2\|_F \right) \end{aligned}$$

也就是

$$\begin{aligned} \left| \|\mathbf{H}_2 \mathbf{F}_{\text{opt}}\|_F - \|\mathbf{H}_2 \mathbf{F}_2\|_F \right| &\leq \sqrt{M} \left( (2\sqrt{M} + 1) d_{\text{ME}} \|\mathbf{H}_1\|_F \right. \\ &\quad \left. + \|\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2\|_F \right) + \|\mathbf{H}_2 \mathbf{F}_{\text{opt}} - \mathbf{H}_1 \mathbf{F}_1\|_F \end{aligned} \quad (7)$$

显然, 不等式(7)的右边表示待优化函数的上界。这里除了  $d_{\text{ME}}$ , 其它量均为已知。由于希望目标函数尽量小, 所以从

概率意义上,矩阵  $d_{ME}$  相对于  $d_{chord}$  在优化系统性能方面起到了主导作用。

#### 4 仿真与分析

正如前面提到的,本文提出的优化测度不仅适用于频率相关性,也同样适用于时域相关性的情况。在分别侧重空间分集的空时分组码和空间复用的 BLAST 两大类典型系统中予以仿真验证。

基于空间分集结构(这里使用 Alamouti 方案)和基于空间复用结构(包含 2 路独立的原始数据流)的预编码矩阵自适应跟踪 MIMO-OFDM 系统的仿真参数如表 1 所示(后者的接收天线数为 4,系统接收机解码采用迫零(ZF)算法)。系统误码率(BER)性能分别如图 2 和图 3 所示。图示中,“无预编码”表示无预编码结构的情况,该系统的发射天线数是 2;“chord”表示采用文献[7]提出的基于 chord 距离跟踪方法的情况,该情况下每次的反馈信息量是 39 bit;“ME”表示本文提出的采用矩阵 Euclid 距离测度的预编码矩阵自适应跟踪方法的情况,该情况下每次的反馈信息量仍然是 39 bit;而“穷尽搜索”表示利用每一个子载波上的信道信息完整地进行 Grassmann 预编码操作的情况,以此作为理想性能参考,该情况下每次的反馈信息量是 1024 bit。随着系统平均接收信噪比(SNR)的增加,本文提出的基于矩阵 Euclid 距离的预编码矩阵自适应跟踪方法相较于文献[7]中的方法性能优势明显。而与理想情况比较,在损失较少性能情况下,有效降低了反馈信息量。

表 1 仿真参数 1

|              |     |             |            |       |      |      |
|--------------|-----|-------------|------------|-------|------|------|
| 发射天线数        | 4   | 调制方式        | QPSK       |       |      |      |
| 接收天线数        | 1   | 簇大小(包含子载波数) | 4          |       |      |      |
| 载波数          | 128 | 跟踪量(bit)    | 1          |       |      |      |
| 码本大小(bit)    | 8   | 信道模型        | 3GPT caseC |       |      |      |
| 多径序号         | 1   | 2           | 3          | 4     | 5    | 6    |
| 延迟( $\mu$ s) | 0.0 | 0.31        | 0.71       | 1.090 | 1.73 | 2.51 |
| 增益(dB)       | 0   | -1.0        | -9.0       | -10   | -15  | -20  |

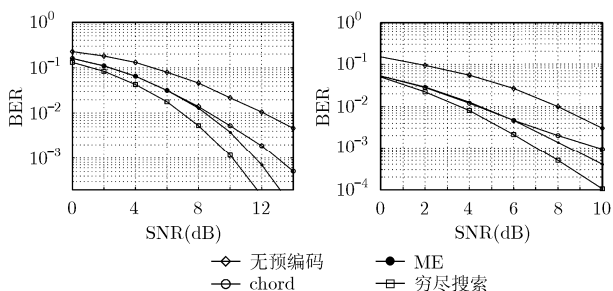


图 2 基于空间分集结构的 MIMO-OFDM 系统中的预编码性能(频域相关性)

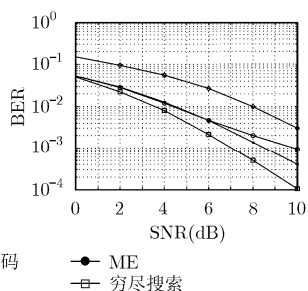


图 3 基于空间复用结构的 MIMO-OFDM 系统中的预编码性能(频域相关性)

下面就 MIMO 信道的时域相关性方面进行仿真讨论。不失一般性地,我们利用经典的 AR 模型来生成时域相关信道。所有相关系数可由第一类零阶 Bessel 函数确定,即  $R[n] = J_0(2\pi f_m |n|)$ , 其中,  $f_m = f_d T$  是被采样率( $1/T$ )归一化的最大多普勒频移。在时域上做预编码矩阵的自适应跟踪将进行周期打孔操作,以此降低跟踪误差扩散,即每若干个时刻需要在整个码本空间中进行一次穷尽搜索,且在每个打孔周期内完成连续预编码矩阵自适应跟踪。基于空间分集结构(Alamouti 方案)和基于空间复用结构(包含 2 路独立的原始数据流)的预编码矩阵自适应跟踪 MIMO 系统的仿真参数如表 2 所示(后者的系统接收天线数是 2)。其误码率性能分别如图 4 和图 5 所示。可以看出,本文提出的矩阵 Euclid 距离测度的方法相较于既有的方法具有一定性能增益,并会随着平均接收信噪比的增加而进一步提高。使用新测度的方法在一个打孔周期内的反馈信息量均为 15 bit,而作为理想性能参考的“穷尽搜索”情况,其反馈信息量为 64 bit。

表 2 仿真参数 2

|          |             |             |      |
|----------|-------------|-------------|------|
| 发射天线数    | 4           | 接收天线数       | 1    |
| 调制方式     | QPSK        | 码本大小(bit)   | 8    |
| 信道模型     | 20-order AR | 相关系数 $R[1]$ | 0.9  |
| 跟踪量(bit) | 1           | 打孔周期(s)     | $8T$ |

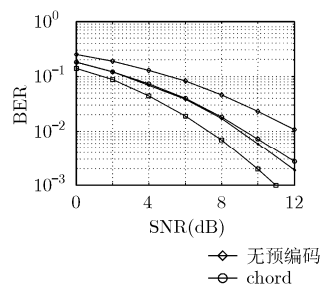


图 4 基于空间分集结构的 MIMO 系统中的预编码性能对比(时域相关性)

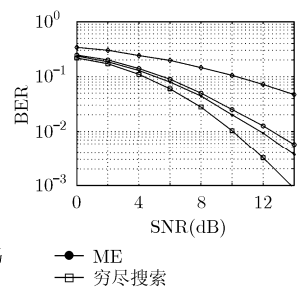


图 5 基于空间复用结构的 MIMO 系统中的预编码性能对比(时域相关性)

#### 5 结束语

存在于客观世界的无线通信信道具有频域、时域及空域上的相关特性。这使得对多天线预编码系统的有限反馈设计研究有了重要切入点。特别是针对多载波宽带系统中的反馈信息量急剧增加的问题展开广泛讨论。本文就是在这样的研究背景下,针对信道在频域和时域的相关特性,就多输入多输出系统中预编码矩阵的自适应跟踪方法进行深入研究,提出一种新的自适应距离测度方案,即利用矩阵 Euclid 距离来实现性能优化的系统处理。理论分析和多角度的仿真结果都表明基于该测度的方法优于既有的方案<sup>[7]</sup>,并且由于其简练的算法,在工程上更具实用性。

## 参 考 文 献

- [1] Skoglund M and Jongren G. On the capacity of a multiple-antenna communication link with channel side information[J]. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 2003, 21(3): 395-405.
- [2] Vu M and Paulraj A. MIMO wireless linear precoding[J]. *IEEE Signal Process. Mag.*, 2007, 24(5): 86-105.
- [3] Love D J and Heath R W. Limited feedback unitary precoding for spatial multiplexing systems[J]. *IEEE Trans. on Inf. Theory*, 2005, 51(8): 2967-2976.
- [4] Love D J and Heath R W. Limited feedback unitary precoding for orthogonal space-time block codes[J]. *IEEE Trans. on Signal Process.*, 2005, 53(1): 64-73.
- [5] Barriac G and Madhow U. Space-time precoding for mean and covariance feedback: Application to wideband OFDM[J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 2006, 54(1): 96-107.
- [6] Lau V, Liu Y, and Chen T A. On the design of MIMO block-fading channels with feedback-link capacity constraints [J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 2004, 52(1): 62-70.
- [7] Zhang H, Li Y, and Stolpman V, *et al.* A reduced CSI feedback approach for precoded MIMO-OFDM systems[J]. *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, 2007, 6(1): 55-58.
- [8] Khaled N, Mondal B, and Leus G, *et al.* Interpolation-based multi-mode precoding for MIMO-OFDM systems with limited feedback[J]. *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, 2007, 6(3): 1003-1013.
- [9] Liu Yi and Zhang Hai-lin. Interpolation-based precoding with limited feedback for MIMO-OFDM systems[J]. *IET Commun.*, 2007, 1(4): 679-683.
- [10] Jafarkhani H. Space-Time Coding: Theory and Practice[M]. New York, Cambridge University Press, 2005: 55-107, 221-249.
- [11] Horn R A and Johnson C R. Matrix Analysis[M]. New York, Cambridge University Press, 2001: 289-290.
- 黄海洋: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为无线通信中的多天线、OFDM、空时码及预编码技术.
- 武 刚: 男, 1975 年生, 副教授, 研究方向为空时编码、信道建模、多天线信号处理、OFDM、多用户信息论.
- 李少谦: 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信、个人通信及扩频通信.