

时间相干信道下波束赋形系统的有限反馈方法

吴 敏 沈 超 袁正定

(北京交通大学信息科学研究所 北京 100044)

摘 要: 该文提出一种新的基于树形码书的有限反馈方法, 由于相邻帧的时间相干性, 信道向量的量化码字可建模为一阶有限状态马尔可夫链, 当前帧信道向量被量化到前一帧最大转移概率码字的子码字上, 该子码字的索引以 1 bit 反馈给发射端。链路仿真结果表明本文所提方法相比普通反馈方法可明显改善误码率性能, 某些条件下还可降低反馈速率。

关键词: 波束赋形; 有限反馈; 时间相干信道; Lloyd 算法

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)10-2343-05

Limited Feedback Approach in Beamforming System over Temporally-correlated Channels

Wu Min Shen Chao Qiu Zheng-ding

(Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: This paper proposes a new limited feedback approach based on tree-structure codebook. As the temporally-correlation across adjacent frames, the quantized channel vector codeword can be modeled as a first-order finite-state Markov chain. The channel vector of current frame is quantized into son-codeword of the codeword with the most transition probabilities corresponding to the previous frame. The index of the son-codeword is fed back to the transmitter with 1 bit feedback. The link simulation results show that, the proposed approach can significantly improve the BER performance relative to the common approach, and the feedback rate can be reduced under some conditions.

Key words: Beamforming; Limited feedback; Temporally correlated channels; Lloyd algorithm

1 引言

MIMO(Multi-Input Multi-Output)技术利用空间复用增益和空间分集增益来大幅度提升系统容量, 是下一代无线通信系统的核心技术, 当发射端具有信道状态信息 CSI(Channel State Information)时, 多天系统容量可得到进一步提升。在空分复用系统中, 发射端利用 CSI 进行预编码来预先消除各数据流间的干扰, 并在各数据流间分配最优功率, 避免信号功率浪费在信道零空间上, 从而改善系统容量。在波束赋形系统中, 发射端利用 CSI 将信号赋形到信道向量空间, 使得在接收端容易得到的分集增益在发射端也能获得, 从而降低终端的天线配置需求。此外, CSI 还可用于多用户调度来获得多用户分集增益。

对于 TDD(Time Division Duplex)系统, CSIT(CSI at the Transmitter)可利用信道对称性来获得, 而在 FDD(Frequency Division Duplex)系统中, CSIT 需要通过专用反馈信道来获得。在 CSI

的诸多反馈方法中, 最为有效的反馈方法是构造一个收发两端都已知的码书, 接收端将估计得到的信道向量量化到该码书中的某个码字上, 并将该码字的索引反馈给发射端, 这就是有限反馈^[1]。文献[2]研究了有限反馈下 MIMO 系统容量, 给出了反馈比特数与容量损失的关系式, 该结论表明反馈速率越高系统容量越大, 而反馈速率的增高会导致数据速率的降低, 因此有必要在反馈速率与系统容量之间进行折中。这就引发了对反馈速率压缩的研究, 如文献[3]利用 MIMO OFDM 系统中的信道频域相干性对子载波分簇反馈来压缩反馈速率; 文献[4]将时间相干信道建模为一阶马尔可夫模型, 并基于信道码字转移概率来进行反馈速率压缩, 即对转移概率大的部分码字重新编制索引来反馈, 这是一种有损压缩; 文献[5]在文献[4]的基础上提出了一种无损反馈速率压缩方法, 即对不同转移概率的码字索引进行 Huffman 编码, 转移概率高的码字使用较短比特的索引, 而转移概率低的码字使用较长比特的索引, 但这种可变反馈速率很难应用于实际系统。

利用信道相干性来降低反馈速率的研究有很

多, 而利用信道相干性提高系统反馈性能的研究并不多。因此本文提出了一种可提高信道向量量化精度的有限反馈方法, 该方法能改善系统误码率, 同时在某些条件下还能降低反馈速率。所提方法使用 Lloyd 算法来构造树形码书, 已知前一帧的信道码字, 找到最大转移概率对应的当前帧信道码字, 接收端将信道向量量化到该码字对应的子码字上, 并将该子码字的索引反馈给发射端。

2 系统模型

本文研究主要基于 MIMO 系统中的发射波束赋形技术, 为了描述简单只考虑单用户多入单出 (MISO) 系统, 假定发射天线数为 M , 接收天线数为 1。此时信道向量可表示为

$$\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_M] \quad (1)$$

h_i 为第 i 根发射天线对应的信道响应, $i = 1, 2, \dots, M$ 。假定发射天线之间不相干, 即 h_i 为独立同分布的瑞利衰落。

使用波束赋形技术后的接收信号可表示为

$$y = \mathbf{h}^H \mathbf{w} s + n \quad (2)$$

这里 \mathbf{w} 为赋形向量, $\mathbf{w} = \mathbf{h}^H / \|\mathbf{h}\|$, 噪声 n 服从均值为零, 方差为 N_0 的高斯分布。

如果发射端没有 CSI, 且不考虑使用空时编码技术, 则此时等功率分配为最优, 假定发射总功率为 P , 对应的系统容量为^[6]

$$C = \log_2 \left(1 + \frac{P \|\mathbf{h}\|^2}{MN_0} \right) \quad (3)$$

如果发射端具有完整的 CSIT 且使用波束赋形技术后, 系统容量可提升为^[6]

$$C = \log_2 \left(1 + \frac{P \|\mathbf{h}\|^2}{N_0} \right) \quad (4)$$

CSIT 的利用可使得 MISO 系统信道容量达到与 SIMO 系统一致, 容量的增加是由分集增益和阵列增益带来的, 波束赋形技术可使系统获得 M 阶的发射分集增益。

在 FDD 系统中由于上下行信道使用不同的发射频段, 使得 FDD 系统不能象 TDD 系统那样利用信道对称性来获得 CSIT, 故 CSIT 通过专用反馈信道来获得。在基于码书的有限反馈中, 需要线下设计一个码书, 这个码书是收发两端都已知的。码书设计主要有 GLP (Grassmannian Line Packing)^[7] 和 Lloyd^[8] 两种主要算法, GLP 算法是基于最大化码书中任意两个码字间的最小距离准则, 在多维复空间中搜索最优码书; Lloyd 算法是在传统向量量化算法的基础上进行修改, 基于最大化信道向量及其对应码字间的均方内积准则, 在最近邻条件和质心条

件间不断迭代计算, 直到向最优码书收敛。

具有 N 个码字的码书可表示为

$$C = \{\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_N\} \quad (5)$$

每个码字均为 $M \times 1$ 维的单位复向量, 系统反馈比特数为 $B = \log_2 N$ 。文献[2]给出了此时的容量损失限

$$\Delta R(P) < \log_2 \left(1 + P \cdot 2^{-\frac{B}{M-1}} \right) \quad (6)$$

该结论表明为保持固定的容量损失, 反馈比特数应随着发射天线数和信噪比增大而增加。

假定接收端知道完整的信道信息, 并将归一化的信道向量方向 $\bar{\mathbf{h}} = \mathbf{h}^T / \|\mathbf{h}\|$ 量化到该码书的某个码字上, 量化方法是选择码书中与信道向量距离最小的码字。

$$\mathbf{f} = \arg \min_{i=1,2,\dots,N} d(\bar{\mathbf{h}}, \mathbf{f}_i) \quad (7)$$

这里距离准则为 Fubini-Study 距离:

$$d(\bar{\mathbf{h}}, \mathbf{f}_i) = \arccos |\bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{f}_i| \quad (8)$$

即

$$\mathbf{f} = \arg \max_{i=1,2,\dots,N} |\bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{f}_i| \quad (9)$$

搜索到最小距离对应的量化码字后, 接收端用 B 个比特将该码字的索引反馈给发射端, 发射端接收到索引后, 找到码书中该索引对应的码字作为信道向量来设计赋形向量, 此时赋形向量为该码字的共轭。具体过程可如图 1 中的系统结构框图所示。

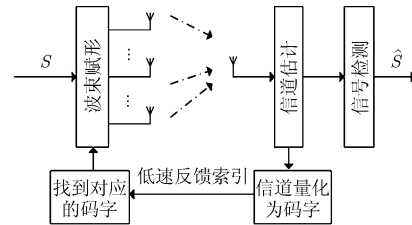


图1 系统结构框图

3 反馈算法

3.1 马尔可夫链

具有时间相干性的信道可以建模为 1 阶马尔可夫模型, 如果用量化码字来代替信道向量, 即为 1 阶有限状态马尔可夫链^[9], 描述这个模型的关键参数是转移概率, 如 $P_{i,j}$ 表示前一帧信道码字是 \mathbf{f}_j 时当前帧信道码字为 \mathbf{f}_i 的概率。

$$P_{i,j} = P(\mathbf{f} = \mathbf{f}_i | \mathbf{f}' = \mathbf{f}_j) \quad (10)$$

$$\sum_{i=1,\dots,N} P_{i,j} = 1 \quad (11)$$

\mathbf{f}' 为前一帧的信道码字。则马尔可夫链的转移概率矩阵可表示为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N1} & \cdots & P_{NN} \end{bmatrix} \quad (12)$$

该矩阵的每列和为 1。

3.2 树形码书

本文中采用的码书构造算法为 Lloyd 算法, 它主要包括两个条件: 最近邻条件和质心条件。最近邻条件是在给定译码器(码字)时保证计算得到的编码器(区域划分)是最优的; 质心条件是在给定编码器时保证计算得到的译码器是最优的。具体详述如下^[8]:

(1)最近邻条件: 给定初始码字 $\{f_i | i = 1, \dots, N\}$, 最优的区域划分为

$$R_i = \{\bar{\mathbf{h}} \in C^{M \times 1} : |\bar{\mathbf{h}}^H f_i| \geq |\bar{\mathbf{h}}^H f_j|, \forall i \neq j\} \quad (13)$$

这里 R_i 表示第 i 个码字 f_i 对应的区域划分。

(2)质心条件: 给定区域划分, 最优码字为

$$f_i = \arg \max_{h \in R_i} E(|\bar{\mathbf{h}}^H f|) \quad (14)$$

由矩阵知识可得

$$f_i = \text{eigenmatrix} \left\{ E(|\bar{\mathbf{h}} \bar{\mathbf{h}}^H|) | \bar{\mathbf{h}} \in R_i \right\} \quad (15)$$

$\text{eigenmatrix} \{ \mathbf{A} \}$ 表示矩阵 \mathbf{A} 的最大奇异值对应的右奇异向量。

Lloyd 算法通过给定初始码书, 再对以上两个条件进行迭代计算, 直到码书收敛为止。下面我们使用 Lloyd 算法来构造树形码书, 具体过程如下:

(1)使用 Lloyd 算法对训练序列计算具有两个码字的码书;

(2)利用(1)中设计好的码书中的两个码字, 对训练序列进行区域划分, 得到两个子序列;

(3)对子序列不断重复步骤(1)和步骤(2)。

通过以上步骤可得到一个具有树形结构的码书, 处于第 n 级的码书包括 2^n 个码字。每个结点码字下的两个分支码字是对该结点码字区域的精细划分, 如图 2 所示。

3.3 反馈方法

本文提出一种新的反馈方法, 即在前一帧对应的最大转移概率码字的子码字中搜索当前帧的最优码字。考虑到信道时间相干性只在连续的有限帧内

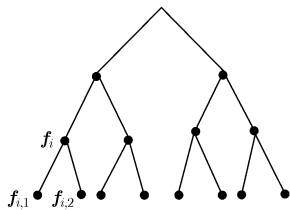


图 2 树形码书结构图

存在, 反馈方法只针对 T 个连续帧, 即每 T 帧为一个反馈周期。假定初始帧反馈比特数为 B , 该反馈方法具体过程如下:

(1)在树形码书的第 B 级码书中搜索第 1 帧的最优信道向量码字, 并假定第 j 个码字是最优码字。

$$f_j = \arg \min_{i=1,2,\dots,N} d(\bar{\mathbf{h}}_1, f_i) \quad (16)$$

这里 $\bar{\mathbf{h}}_1$ 为第 1 帧的信道向量, f_i 为第 B 级码书中第 i 个码字, 码字数为 $N = 2^B$ 。

(2)根据前一帧的信道量化码字 f_j 可以确定当前帧最有可能的码字为 f_i , f_i 是最大转移概率对应的码字。

$$P_{i,j} = \arg \max_{k=1,\dots,N} P_{k,j} \quad (17)$$

(3)将当前帧的信道向量量化到码字 f_i 的两个分支码字上, 这样就得到了更精确的信道向量量化。

$$f = \arg \max_{j=1,2} |\bar{\mathbf{h}}^H f_{ij}| \quad (18)$$

这里 f_{ij} 为 f_i 的子码字, $j = 1, 2$ 。接收端使用 1 bit 来反馈该子码字, 比特 0 表示第 1 个子码字, 比特 1 表示第 2 个子码字。

(4)重复步骤(2)和步骤(3)直到第 T 帧。

在该反馈方法中, 初始帧在树形码书的 B 级码书中搜索最优码字, 所需反馈比特数为 B , 其余帧在前一帧最大转移概率码字的子码字中搜索最优码字, 所需反馈比特数为 1, 当初始反馈比特数 B 大于 1 时, 该方法相对普通反馈方法可以降低反馈速率。

如果当前帧的实际信道向量码字不是前一帧对应的最大转移概率码字, 那么当前帧的信道向量量化精度反而会降低, 系统性能会变差, 但这种情况发生的概率比较小, 且由于每间隔 T 帧就以初始比特数反馈, 这种小概率的差错不会无限叠加, 对系统性能影响不大。

4 仿真结果

链路仿真采用 QPSK 调制, 发射天线数为 4, 接收天线数为 1, 不同发射天线对应的信道响应独立, 均为具有多普勒频偏的单径瑞利衰落信道。假定接收端为理想信道估计, 反馈信道无误差, 且不考虑反馈时延的影响, 以未编码系统的 BER(Bit Error Rate)作为性能指标。

图 3 给出了不同归一化多普勒频偏下连续帧信道向量的时间相干性, 归一化多普勒频偏定义为 $f_D \cdot T_f$, 这里 f_D 为多普勒频偏, 单位为赫兹, T_f 为数据帧长度, 单位为秒。由图可知归一化多普勒频偏越小, 连续帧之间的相干性越强, 具有相干性的连续帧帧数越多。

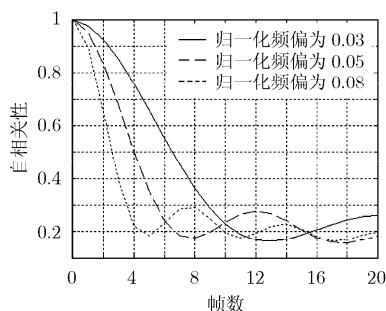


图3 不同归一化频偏下的时间相关性

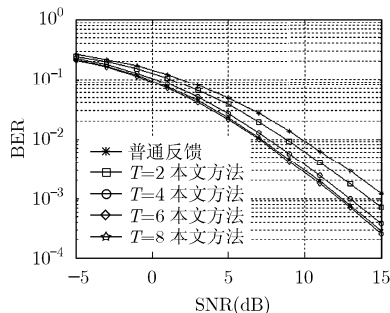
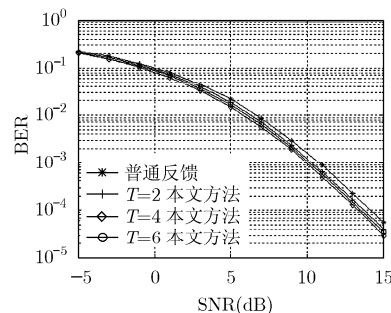
图4 归一化频偏为 0.03, $B=1$ 时的 BER图5 归一化频偏为 0.03, $B=2$ 时的 BER

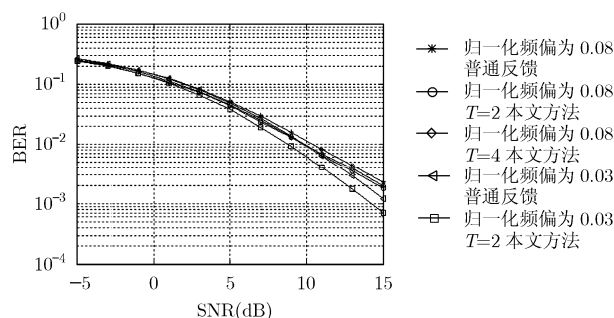
图4给出了归一化多普勒频偏为0.03, 初始反馈比特数为1, 不同反馈周期时的误码率性能。普通反馈指没有利用信道相干性的反馈方法, 即对每帧的信道向量都量化到固定码书上并反馈。仿真结果表明在不增加反馈速率的前提下, 本文提出的反馈方法相比普通反馈方法可有效改善系统误码率性能, 如反馈周期为6帧时, 误码率性能可提高近3个dB的增益。随着反馈周期增大, 性能增益越好, 但当反馈周期增加到一定数时, 性能增益反而会降低, 这是因为反馈周期过小时信道相干性没有被充分利用, 而反馈周期过大时, 某些数据帧与初始帧的信道相干性已降低, 从而导致性能降低。

图5给出了归一化多普勒频偏为0.03, 初始反馈比特数为2, 不同反馈周期时的误码率性能。当初始反馈比特数为2时, 本文所提反馈方法可降低反馈速率, 如 $T=2$ 时, 平均每帧反馈比特数为1.5, $T=4$ 时, 平均每帧反馈比特数为1.25。仿真结果表明在反馈周期为4帧时, 本文所提反馈方法相比普通反馈方法, 以较低的反馈速率提高了近0.7 dB的误码率性能增益。

图6给出了初始反馈比特数为1, 不同归一化多普勒频偏时的误码率性能。仿真结果表明两种反馈方法下的误码率性能都随着归一化多普勒频偏增大而变差, 在较大归一化多普勒频偏时, 本文提出的反馈方法仍可改善误码率性能, 但相对较低归一化多普勒频偏, 改进的误码率增益有所降低。此外在较大归一化多普勒频偏时, 适宜使用较小的反馈周期。

5 结束语

本文针对有限反馈波束赋形系统, 提出了一种基于树形码书的有限反馈方法, 利用信道的时相干性, 已知前一帧信道量化码字而找出最大转移概率对应的当前帧信道码字, 将当前帧信道向量量化到该码字的子码字上, 从而提高信道向量的量化精度。仿真结果表明在较低归一化多普勒频偏及较低

图6 不同归一化频偏下 $B=1$ 时的 BER

初始反馈比特数时, 所提方法可有效提高系统误码率性能, 在初始反馈比特数大于1时, 所提方法还可降低一定的反馈速率。这种反馈方法也可以略作修改并推广到MIMO空分复用预编码系统中。

参考文献

- [1] Love D J, Heath R W, and Lau V K N, *et al.* An overview of limited feedback in wireless communication systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(8): 1341-1365.
- [2] Jindal N. MIMO broadcast channels with finite rate feedback. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(11): 5045-5059.
- [3] Choi J, Mondal B, and Heath R W. Interpolation based unitary precoding for spatial multiplexing MIMO-OFDM with limited feedback. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(12): 4730-4740.
- [4] Huang Kai-bin, Mondal B, and Heath R W, *et al.* Multi-antenna limited feedback for temporally-correlated channels: Feedback compression. Global Telecommunications Conference, (GLOBECOM), San Francisco, CA, USA, Nov. 27-Dec.1, 2006, WLC38-5: 1-5.
- [5] Simon C and Leus G. Feedback reduction for spatial multiplexing with linear precoding. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Honolulu, Hawaii, USA, April 15-20, 2007, 3: 33-36.

- [6] Paulraj A, Nabar R, and Gore D. Introduction to Space-Time Wireless Communications. First Published, United Kingdom: Cambridge University Press, 2003: 65-75.
- [7] Love D J, Heath R W, and Strohmer T. Grassmannian beamforming for multiple-input multiple-output wireless systems. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(10): 2735-2747.
- [8] Murthy C R and Rao B D. Quantization methods for equal gain transmission with finite rate feedback. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(1): 233-245.
- [9] Huang Kai-bin, Mondal B, and Heath R W, *et al.* Markov models for limited feedback MIMO systems. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Toulouse, France, May 15-19, 2006, 4: IV-IV.
- 吴 敏: 女, 1980年生, 博士生, 研究方向为MIMO预编码技术及有限反馈.
- 沈 超: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为MIMO资源分配及多用户调度.
- 裘正定: 男, 1944年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信号与信息处理、信息安全认证技术、新一代无线通信技术.