

MIMO 系统中一种基于邻域的有限反馈方法

吴敏, 沈超, 裘正定

(北京交通大学计算机与信息技术学院, 北京 100044)

摘要: 针对时间相干信道下多输入多输出 (multiple input multiple output, MIMO) 波束赋形系统提出了一种基于邻域的有限反馈方法。该方法利用相邻帧波束赋形码字间的相关性, 将前一帧波束赋形码字的邻域内码字组成当前帧的新码本, 从而降低反馈比特数, 并给出周期性反馈和自适应反馈两种方案。仿真结果表明所提方案相比普通反馈方法能有效降低反馈速率, 周期性反馈能显著降低反馈量但有一定的性能损失, 自适应反馈能适当降低反馈量且没有任何性能损失。

关键词: 波束赋形; 有限反馈; 时间相干; 自适应反馈

中图分类号: TN 929.5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2010.07.005

Neighborhood-based limited feedback approach in MIMO systems

WU Min, SHEN Chao, QIU Zheng-ding

(School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong Univ., Beijing 100044, China)

Abstract: For MIMO beamforming systems over temporally-correlated channels, a novel limited feedback approach based on neighborhood is proposed. In the approach, exploiting the correlation of beamforming codewords corresponding to adjacent frames, the new codebook of current frame consists of the codewords within in the neighborhood of previous beamforming codeword, thereby the number of feedback bits can be reduced. Then both periodic feedback scheme and auto-adaptive feedback scheme are presented. The simulation results show that the presented schemes can reduce efficiently the feedback rate compared to common feedback approach. The periodic feedback can reduce remarkably feedback amount with some performance loss, while the auto-adaptive feedback can reduce moderately feedback amount without any performance loss.

Keywords: beamforming; limited feedback; temporally correlation; auto-adaptive feedback

0 引言

在无线通信系统中, 发射端信道状态信息 (channel state information, CSI) 可用来大幅度提升系统容量^[1-3], 如在单用户多输入多输出 (multiple input multiple output, MIMO) 系统中, 发射端可利用 CSI 来实现发射波束赋形技术^[4-5], 从而获得发射分集增益和阵列增益。在多用户 MIMO 系统中, 发射端可利用 CSI 来实现预编码技术, 以预先消除各用户数据流间的干扰并分配最优功率^[6-7], 从而获得空间复用增益。在时分双工系统中, 发射端 CSI 可利用信道对称性来获得, 而在频分双工系统中, 发射端 CSI 需要通过反馈信道来获得。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本, 接收端将设计好的赋形向量或预编码矩阵映射到该码本中的某个码字上, 并将该码字的索引反馈给发射端, 发射端通过该索

引找到对应的码字实现波束赋形或预编码技术, 这就是基于码本的有限反馈^[8]。

文献[9]研究了有限反馈 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吞吐量越大, 而反馈开销的增高会降低系统的有效性, 因此有必要在反馈速率与系统吞吐量之间进行折中, 这就引发了对反馈速率压缩的研究。在时间相干信道中, 信道的时相干性可用来压缩反馈速率, 如文献[10]将时间相干信道建模为一阶有限状态马尔可夫模型, 并基于相邻帧码字的转移概率来降低反馈速率, 将转移概率大的部分码字重新编制索引, 而将转移概率小的部分码字忽略, 这是一种有损压缩, 即存在一定的性能损失; 文献[11]在文献[10]的基础上提出了一种无损压缩方法, 基于转移概率对码字索引进行 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, 这种反

收稿日期: 2009-05-21; 修回日期: 2009-11-15。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973 计划) (2007CB307100) 资助课题

作者简介: 吴敏 (1980-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为 MIMO 预编码及有限反馈。E-mail: waywm@163.com

馈方法可以达到最低的统计平均反馈速率。

文献[10-11]虽能有效降低时间相干信道下的反馈速率,但前提是必须知道信道的统计特性,在算法初始接收端需要通过大量训练帧来获得马尔可夫转移概率矩阵,并将此转移概率矩阵告知发射端,同时也需要一定的存储单元,当信道的多普勒频移有较大改变时,则需要重新训练来获得新的码字转移概率矩阵,这会增加实际系统的复杂度。对此,本文提出了一种新的反馈方法,该方法以前一帧码字的邻域内部分码字作为当前帧的新码本,无须知道码字转移概率矩阵就可以有效降低反馈速率。随后给出周期性反馈和自适应反馈两种方案,周期性反馈是指每间隔一些帧就以初始码本来反馈,为有损压缩;自适应反馈是指当前帧码字不在前一帧码字的邻域内时,就以初始码本来反馈,为无损压缩。最后通过计算机仿真给出两种反馈方案和普通反馈的总反馈比特数和误码率性能比较。

1 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,配置 M_t 个发射天线和 M_r 个接收天线的 MIMO 波束赋形系统框图如图 1 所示。在发射端数据信号 s 乘以 M_t 维波束赋形向量 $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_{M_t}]^T$,在接收端接收信号乘以 M_r 维合并向量 $\mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_{M_r}]^T$ 。为了便于分析,假设信道是平坦的,那么合并信号 y 可以表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{z}^H (\mathbf{H}\mathbf{w}s + \mathbf{n}) \quad (1)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1M_t} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{1M_r} & \dots & h_{M_r M_t} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, h_{ij} 为第 j 根发射天线到第 i 根接收天线的子信道响应,其包络服从独立同分布的 Rayleigh 衰落; $\mathbf{n} = [n_1, n_2, \dots, n_{M_r}]$ 为噪声,服从均值为零方差为 N_0 的复高斯分布。假定总发射功率为 P ,为保持发射功率不变,波束赋形向量 \mathbf{w} 的 2-范数严格限制为 1。

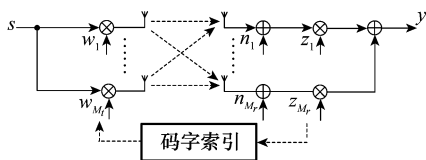


图 1 MIMO 波束赋形系统的结构框图

在 MIMO 波束赋形系统中,可联合设计波束赋形向量 \mathbf{w} 和接收合并向量 \mathbf{z} 来使得接收信噪比 (signal noise ratio, SNR) 最大,SNR 可表示为

$$\gamma = \frac{P}{N_0} |\mathbf{z}^H \mathbf{H}\mathbf{w}|^2 \quad (3)$$

式中, $|\mathbf{z}^H \mathbf{H}\mathbf{w}|^2$ 为有效信道增益,不失一般性,假定 $\|\mathbf{z}\| = 1$,对于任意 \mathbf{w} ,SNR 最大化可以用最大比合并 (maximum ratio combining, MRC) 技术来实现,那么接收合并向量为

$$\mathbf{z} = \frac{\mathbf{H}\mathbf{w}}{\|\mathbf{H}\mathbf{w}\|} \quad (4)$$

则 SNR 等价于

$$\gamma = \frac{P}{N_0} \|\mathbf{H}\mathbf{w}\|^2 \quad (5)$$

问题简化为设计波束赋形向量 \mathbf{w} 来使得 SNR 最大化,当发射端已知完整的信道矩阵 \mathbf{H} 时,可采用最大比发射 (maximum ratio transmission, MRT) 技术,最优波束赋形向量 \mathbf{w} 为信道矩阵 \mathbf{H} 的最大奇异值对应的右奇异向量^[12]。但在实际通信系统中,发射端很难知道完整的信道矩阵 \mathbf{H} ,假定存在一条从接收端到发射端的低速、无误差和无时延的反馈链路,接收端通过该反馈链路将设计好的波束赋形向量告知发射端,这就是有限反馈波束赋形系统。

在基于码本的有限反馈方法中,需要线下构造一个收发两端都已知的码本。码本设计主要有 (grassmannian line packing, GLP)^[13] 和 Lloyd^[14] 两种主要算法,GLP 算法是基于最大化码本中任意两个码字之间的最小距离准则,在多维复空间中搜索最优码本;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,直到向最优码本收敛。具有 L 个码字的码本可表示为

$$\Omega = \{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_L\} \quad (6)$$

假定接收端知道完整 CSI,通过某种优化准则在码本中选择最佳波束赋形码字,如使得接收 SNR 最大化的最佳波束赋形码字可表示为

$$\mathbf{w}^* = \arg \max_{\mathbf{w} \in \Omega} \|\mathbf{H}\mathbf{w}\|^2 \quad (7)$$

接收端用 $\mathbf{B} = \log_2 L$ 个比特来给 L 个码字编制索引,并将最佳赋形码字 \mathbf{w}^* 的索引反馈给发射端,发射端通过此索引找到码本中对应的码字,并以此码字作为发射波束赋形向量。

2 反馈算法

在文献[10]中,时间相干信道下相邻帧的波束赋形码字存在一定的相关性,可建模为一阶有限状态马尔可夫链^[15],描述这个模型的关键参数是码字间转移概率 $P_{i,j}$,表示前一帧码字是 \mathbf{w}_j 时当前帧码字为 \mathbf{w}_i 的概率,转移概率受信道相干性和码本大小影响,同时转移概率与码字间距离有一定的对应关系,即转移概率最大的当前帧码字就是前一帧码字本身,转移概率较大的当前帧码字与前一帧码字距离较近,而距离前一帧码字最远的码字转移概率最小。

由于信道的时相干性,当前帧码字以极高的概率分布在前一帧码字的邻域内,基于此现象,这里提出一种基于邻域的有限反馈方法,已知前一帧波束赋形码字来确定当前帧的新码本,新码本由与前一帧码字相邻的部分码字组成,这些码字构成一个较小的邻域,由于新码本中码字个数较少使得反馈比特数有效降低,具体过程如图 2 所示。相对文献[10-11]中所提的反馈速率压缩方法,这种基于邻域的有限反馈好处在于不需要统计和存储转移概率矩阵就能降低反馈速率,实现起来简单有效。下面分别给出周期

性反馈和自适应反馈两种实现方案,假定 L 是初始码本中的码字个数, L' 是新码本中的码字个数。

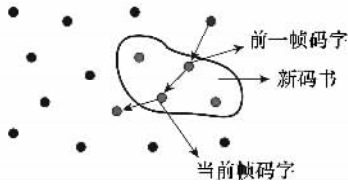


图2 基于邻域的有限反馈

周期性反馈是指每间隔一些帧就以初始码本反馈,假定 T 帧为一个周期且收发两端都约定好 T , 每 T 帧中有一帧以初始码本反馈,其他 $T-1$ 帧采用基于邻域的有限反馈。周期性反馈具体步骤如下:

步骤1 在含有 L 个码字的初始码本 Ω 中搜索第一帧的最佳波束赋形向量,并假定第 i 个码字是最优码字。

$$w_i = \arg \max_{w \in \Omega} \|Hw\|^2 \quad (8)$$

式中, H 为第一帧的信道矩阵,本帧需要 $B = \log_2 L$ 个反馈比特。

步骤2 确定新码本 Ω' , Ω' 由 w_i 的 L' 个相邻码字组成,包括 w_i 本身,并以与 w_i 的距离升序排列来编制索引。

$$\Omega' = \{w_1, w_2, \dots, w_{L'}\} \quad (9)$$

$$|w_1^H w_1|^2 > |w_1^H w_2|^2 > \dots > |w_1^H w_{L'}|^2 \quad (10)$$

步骤3 在含有 L' 个码字的新码本 Ω' 中搜索第二帧的最佳波束赋形向量。

$$w^* = \arg \max_{w \in \Omega'} \|Hw\|^2 \quad (11)$$

式中, H 为第二帧的信道矩阵,本帧需要 $B' = \log_2 L'$ 个反馈比特,故降低了 $B - B'$ 个反馈比特。

步骤4 重复步骤2和步骤3直到第 T 帧结束。

在周期性反馈方案中,当信道在时间上突变较大时,会出现当前帧码字不在前一帧码字邻域内(即新码本 Ω' 中)的情况,这样会产生反馈差错,而每间隔 T 帧就以初始码本反馈,这种差错产生的性能损失就不会无限叠加。由于发射端在某些帧不能正确跟踪码字,使得周期性反馈是有损压缩,下面提出的自适应反馈是无损压缩,若当前帧码字不在前一帧码字邻域内,就以初始码本反馈,这样发射端能始终正确跟踪码字,即使在信道有突变的情况下。自适应反馈的步骤1和步骤2与周期性反馈相同,不同步骤如下:

步骤5 在初始码本 Ω 中搜索第二帧的最佳波束赋形向量。

$$w^* = \arg \max_{w \in \Omega} \|Hw\|^2 \quad (12)$$

这里 H 为第二帧的信道矩阵,若 w^* 也属于 Ω' 内,则按 Ω' 内的索引来反馈,该帧只需 $B' = \log_2 L'$ 个反馈比特,可降低 $B - B'$ 个反馈比特;若 w^* 不属于 Ω' 内,则按 Ω 内的索引来反馈,该帧需要 B 个反馈比特。

步骤6 一直重复步骤2和步骤3。

在自适应反馈方案中,发射端能一直正确跟踪码字,没有任何性能损失就可有效降低反馈速率,但也给系统带来了辅助信令的开销,在反馈比特与其他数据或信令比特混

合在一起时,需要辅助接收端区分初始码本索引和新码本索引,最简单的方法是在反馈比特的前面增加一个辅助比特,比特0表示后面的 B 个比特为初始码本索引,比特1表示后面的 B' 个比特为新码本索引,而在反馈比特专用的反馈信道则不需要。

3 仿真分析

链路仿真考虑 MIMO 波束赋形系统,发射天线数为 4,接收天线数为 2,不同收发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。数据帧时间长度为 1 ms,多普勒频偏为 30 Hz,仿真中使用的码本以 Lloyd 算法构造,初始反馈比特数为 $B = 4$,调制方式为 QPSK,每个点的蒙特卡罗仿真信道数为 10^6 。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,以未编码码系统的误码率(bit error ratio, BER)作为性能指标。

图3和图4分别给出了 $B' = 1$ 和 $B' = 2$ 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,每帧的波束赋形向量量化到固定码本上。自适应反馈是无损压缩,误码率性能与普通反馈方法相同,故没有在此性能比较中表示。结果表明周期性反馈相对普通反馈有一定的性能损失,周期越大,性能损失越大,这是由于帧数增多信道突变的概率会增大。邻域(新码本码字个数)越小,性能损失越大,这是由于使用较少码字的新码本,码字跟踪错误的几率增大。在某些情况下,误码率性能损失非常小几乎可以忽略,如 $B' = 2$ 且 $T = 2$ 时。

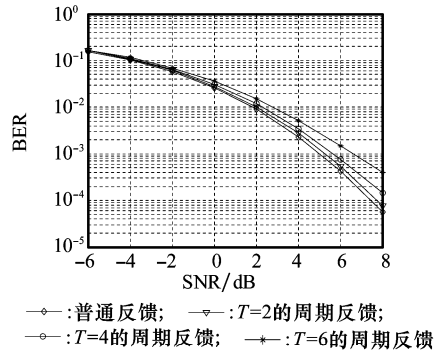


图3 BER性能 ($B' = 1$)

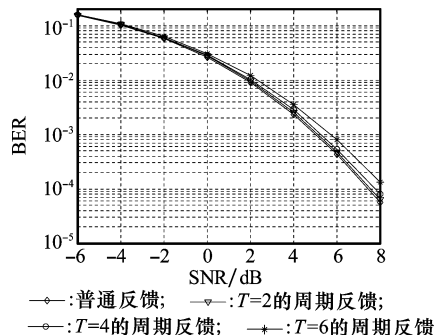


图4 BER性能 ($B' = 2$)

图 5 和图 6 分别给出了 $B'=1$ 和 $B'=2$ 时的总反馈比特数。对于自适应反馈,这里统计的是增加辅助比特后的总反馈比特数。结果表明两种反馈方案相对普通反馈都能大大降低总反馈比特数,如 $T=6$ 周期反馈的平均反馈速率达到 1.5 比特。对于周期性反馈,周期越大或邻域越小,平均反馈速率就越低,与之对应的误码率性能损失也越大,建议针对实际系统需求选择合适的反馈周期和邻域大小。在 $B'=1$ 时,自适应反馈的总反馈比特数要低于 $T=2$ 的周期性反馈,且没有任何性能损失,要优于周期性反馈。

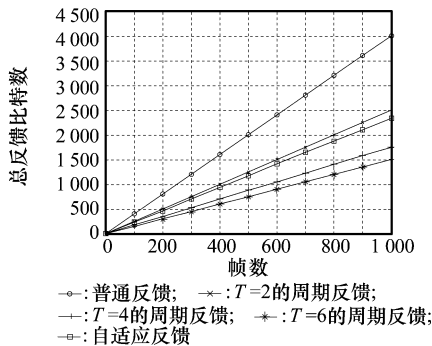


图 5 总反馈比特数 ($B'=1$)

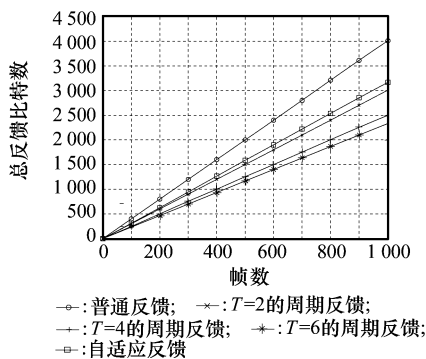


图 6 总反馈比特数 ($B'=2$)

4 结论

本文针对时间相干信道下 MIMO 波束赋形系统,提出了一种基于邻域的有限反馈方法,该方法无须统计和存储码字间转移概率就能有效压缩反馈速率,并给出周期性反馈和自适应反馈两种方案。仿真结果表明相对普通反馈方法,本文所提反馈方案能显著降低反馈比特数,且性能损失可忽略不计。周期性反馈方案中,周期越大或邻域越小,降低反馈比特数越多,但误码率性能损失也越大。而自适应反馈算法降低反馈比特数适中,且没有任何性能损失。这两种反馈方案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] Bhashyam S, Sabharwal A, Aazhang B. Feedback gain in multiple antenna systems [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002,50:785-798.
- [2] Goldsmith A, Jafar S A, Jindal A, et al. Capacity limits of MIMO channels[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003,21(5):684-702.
- [3] Love D J, Heath R W, Santipach W, et al. What is the value of limited feedback for MIMO channels[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2004,42(1):54-59.
- [4] Mulkavilli K K, Sabharwal A, Erkip E, et al. On beamforming with finite rate feedback in multiple-antenna systems[J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2003,49(10):2562-2579.
- [5] Xia P, Giannakis G B. Design and analysis of transmit beamforming based on limited-rate feedback[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2006,54(5):1853-1863.
- [6] Love D J, Heath R W. Limited feedback unitary precoding for spatial multiplexing systems[J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2005,51(8):2967-2976.
- [7] Love D J, Heath R W. Limited feedback unitary precoding for orthogonal space-time block codes[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2005,53(1):64-73.
- [8] Love D J, Heath R W, Lau V K N, et al. An overview of limited feedback in wireless communication systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008,26(8):1341-1365.
- [9] Jindal N. MIMO broadcast channels with finite rate feedback[J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2006,52(11):5045-5059.
- [10] Huang K, Mondal B, Heath R W, et al. Multi-antenna limited feedback for temporally-correlated channels: feedback compression[C]// *Global Telecommunications Conference*, 2006:1-5.
- [11] Simon C, Leus G. Feedback reduction for spatial multiplexing with linear precoding[C]// *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2007:33-36.
- [12] Dighe P A, Mallik R K, Jamuar S S. Analysis of transmit-receive diversity in Rayleigh fading[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2003,51(4):694-703.
- [13] Love D J, Heath R W, Strohmer T. Grassmannian beamforming for multiple-input multiple-output wireless systems [J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2003, 49 (10): 2735-2747.
- [14] Roh J C, Rao B D. Vector quantization techniques for multiple antenna channel feedback[C]// *International Conference on Signal Processing and Communications*, India: IEEE, 2004: 402-406.
- [15] Huang K, Mondal B, Heath R W, et al. Markov models for multi-antenna limited feedback systems[C]// *International Conference Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2006:9-12.