

一种 MIMO 时间相干信道下的有限反馈新方法

范文兵, 郭云, 王振义, 孟小超, 季纲

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对时间相干 MIMO 信道下存在时间冗余的问题, 提出了一种基于信道预测的有限反馈新方法. 该方法利用相邻数据帧的时间相干性, 结合 AR 模型预测信道状态信息, 并在码书中找到一个最优的码字使多个数据帧的系统性能综合最优, 将该码字反馈给发送端用于发射预处理. 仿真结果表明, 与传统反馈方法相比, 虽然该反馈方法的系统性能有所降低, 但是反馈开销显著降低, 因此在两者之间获得较好的折中.

关键词: MIMO; 时间相干; 有限反馈; AR 模型

中图分类号: TN92 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.03.011

0 引言

无线通信系统中, 发射端信道状态信息(Channel State Information, CSI)可以被有效地用来提高系统的信道容量^[1]. 在单用户 MIMO 系统中, 发射端 CSI 用来实现发射波束成形, 提高通信的可靠性. 在多用户 MIMO 系统中, 发射端利用 CSI 实现预编码技术, 提前消除用户数据流间的干扰, 同时优化功率分配^[2]. 在 TDD 系统中, 发射端 CSI 可以由信道的互易性来得到; 在 FDD 系统中, 发射端 CSI 需要通过反馈链路获得^[3].

有限反馈技术中, 普遍应用的是基于码书的有限反馈技术. 所谓基于码书的有限反馈技术, 就是接收端和发送端都存有预先设计好的码书, 接收端根据当前 CSI, 按照特定的码字选取标准, 选择码书中的最优码字, 然后将最优码字索引反馈给发送端, 发送端根据该码字索引从码书中匹配对应的码字, 用于发射预处理.

与 SISO(单输入单输出)系统相比, 随着多天线在 MIMO 系统中的应用, 信道系数规模剧增, 导致反馈开销大幅增加. 因此, 如何在不影响系统性能的前提下, 有效降低反馈开销, 逐渐成为有限反馈技术研究的重要内容.

文献[4]在对有限反馈 MIMO 系统容量研究的基础上, 得到了反馈速率与系统吞吐量的反比

关系, 因此, 如何在反馈速率和系统吞吐量之间折中, 就引发了反馈压缩的研究. 在时间相干信道中, 信道的时间相干性可以被用来压缩反馈速率. 由于时间相干信道矩阵有时间相干性, 所以由其矩阵量化得到的波束成形向量也具有时间相干性, 且时间相干信道矩阵可以用 AR 模型预测. 受此启发, 笔者提出一种有限反馈新方法, 与传统方法每帧数据反馈一个码字不同, 该方法 N 个连续的数据帧共用一个码字, 从而以 N 倍速率降低反馈量, 且利用 AR 预测模型来提高精度.

综上所述, 笔者在对反馈压缩研究的基础上, 针对时间相干信道, 提出了一种降低开销的有限反馈新方法, 并对已知 CSI、未知 CSI、传统方法以及本文方法进行仿真比较. 仿真结果表明: 所提方法可以有效降低时间相干信道 MIMO 系统的反馈开销, 且系统性能也有较好表现.

1 系统模型

MIMO 有限反馈系统的框图如图 1 所示. 假定发射端发射天线为 T_x 根, 接收端接收天线为 R_x 根.

图 1 中 MIMO 系统的信道矩阵为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1T_x} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{R_x1} & \cdots & h_{R_xT_x} \end{bmatrix}.$$

(1)

收稿日期:2013-10-30;修订日期:2013-12-19

基金项目:河南省自然科学基金项目(2010A510014)

作者简介:范文兵(1965-),男,河南郑州人,郑州大学教授,博士,主要从事移动通信等方向研究,E-mail:iewbfan@zzu.edu.cn.

式中, h_{ij} 为第 j 根发射天线与第 i 根接收天线间的信道系数, 服从独立同分布的瑞丽衰落, 且信道具有时间相干性。

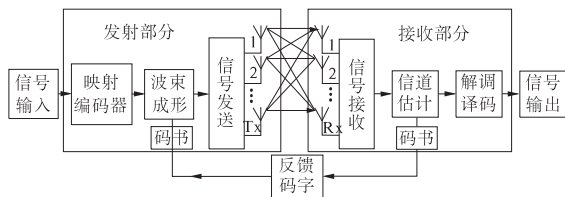


图1 MIMO有限反馈系统结构框图

Fig.1 MIMO limited feedback system block diagram

在移动通信过程中, 当发送端和接收端存在相对运动时, 就会产生多普勒频移。最大多普勒频移为 $f_d = 2\pi v/\lambda$, 其中, v 为收发天线间的相对移动速度, λ 是载波波长。而信道相干时间与多普勒频移近似为倒数^[5]。所以, 时间相干信道中多普勒频移是一个重要参数。

在独立同分布 MIMO 时间相干瑞丽衰落信道中, 信道系数矩阵 $\mathbf{H}(n)$ 的每个信道系数 $h_{ij}(n)$ 的时间相干性定义为

$$\rho_k = E\{|h_{ij}^*(n)h_{ij}(n+k)|^2\} \\ = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M |h_{ij}^*(n)h_{ij}(n+k)|^2. \quad (2)$$

其中, ρ_k 指相隔 k 个数据帧的信道系数的时间相干性, 可用公式(3)零阶 Bessel 函数来描述^[6], 其实现方法可以参考文献[7-8]。

$$\rho_k = J_0(2\pi f_d T_s k). \quad (3)$$

式中: f_d 为最大多普勒频移; T_s 为数据帧的持续时间。

2 基于信道预测的有限反馈新方法

2.1 新方法的理论基础

在文献[9]中, 时间相干信道下相邻帧的信道矩阵具有时间相关性, 此情况下的波束成形向量之间也存在一定的时间相关性。理想波束成形向量为信道矩阵奇异值(SVD)分解的右奇异矩阵的第一列, 所以相干信道下理想波束成形向量也具有相关性。由于信道时间相关性, 这就使得多个数据帧共用同一个波束成形向量成为可能, 又由于时间相干 MIMO 信道矩阵可用 AR 模型来预测^[10], 这使得此反馈速率压缩方法变为现实。

本文方法的思想是: 首先, 根据已知帧的 CSI 对未来多帧的 CSI 进行预测; 其次, 在预测的多帧 CSI 中, 根据信道矩阵的理想波束成形向量相关性强弱, 找到最优的量化数据帧信道矩阵; 最后,

根据最优的量化数据帧信道矩阵或理想波束成形向量, 在码书中选取最优波束成形向量, 即获得反馈的最优码字。

信道预测中, m (m 为与下面公式中一致的数学符号) 阶的 AR 信道预测函数可表示为

$$\tilde{\mathbf{H}}(k) = - \sum_{j=1}^m a_j \mathbf{H}(k-j). \quad (4)$$

式中: $\mathbf{H}(k-j)$ ($j=1, 2, \dots, m$) 为已知的前 m 个数据帧中第 j 个数据帧的信道矩阵; $\tilde{\mathbf{H}}(k)$ 为第 $m+1$ 帧的预测信道矩阵; 预测系数 a_k 与信道的相关系数 ρ_k 的计算关系见式(5)。

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \rho_0 & \rho_{-1} & \cdots & \rho_{-m+1} \\ \rho_1 & \rho_0 & \cdots & \rho_{-m+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{m-1} & \rho_{m-2} & \cdots & \rho_0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_m \end{bmatrix}. \quad (5)$$

这里 ρ_k 指相隔 k 帧信道的的时间相干性, 由零阶 Bessel 函数得到。

2.2 新方法的实现步骤

设时间相干 MIMO 系统, 发射天线数和接收天线数分别为 T_x 和 R_x , 不同收发天线间的信道系数独立同分布, 且均为具有多普勒频移的瑞利衰落信道, 多普勒频移为 f_d , 数据帧时间长度为 T_s , 预测信道矩阵个数为 D ($D>0$, D 为整数), AR 模型的阶数为 m , 新方法的步骤如下:

(1) 将 $k=0, \dots, m$ 代入式(3), 得 $m+1$ 个相

关系数, 并生成矩阵 (I) $\begin{bmatrix} \rho_0 \\ \rho_1 \\ \vdots \\ \rho_m \end{bmatrix}$ 和 (II)

$\begin{bmatrix} \rho_0 & \rho_{-1} & \cdots & \rho_{-m+1} \\ \rho_1 & \rho_0 & \cdots & \rho_{-m+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{m-1} & \rho_{m-2} & \cdots & \rho_0 \end{bmatrix}^{-1}$, 其中矩阵 (II) 为

Hankel 矩阵。

(2) 将步骤 1 中的矩阵 (I) 和 (II) 代入式(5), 计算预测系数矩阵 $[a_1 \ a_2 \ \cdots \ a_m]^T$ 。

(3) 生成 $m+D$ 个多普勒频移为 f_d 、数据帧时间长度为 T_s 、不同收发天线对应信道响应独立的、维数为 $R_x \times T_x$ 的瑞利衰落信道矩阵。

(4) 依次预测第 $m+1, m+2, \dots, m+D$ 帧的信道矩阵。

(5) 依次对预测的第 $m+1, m+2, \dots, m+D$ 帧的信道矩阵进行奇异值(SVD)分解, 并存储其右奇异矩阵的第一列, 记为 $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_D$ 。

(6)从 V_1, V_2, \dots, V_D 中依次选取一个向量,与其他向量求相关,并对该向量与其他向量的相关系数求和,使相关系数和最大的向量 $V_i(1 \leq i \leq D)$ 所对应的信道矩阵 $H_{m+i}(1 \leq i \leq D)$,即最优的量化矩阵,记作 H_s .

(7)以 H_s 为量化矩阵,在码书中选择最优波束成形向量,并将其索引号,即码字,反馈到发送端.

(8) D 个连续数据帧共用同一波束成形向量发送数据,仿真根据信道容量及误码率等性能验证方法的可靠性.

3 仿真分析

下面通过分析仿真结果,来证明笔者所提方法的有效性.仿真系统为MIMO有限反馈系统,采用发射端波束成形.假设发射天线和接收天线数为4和2,即 $T_x=4, R_x=2$.不同收发天线间的信道系数相互独立,且均为具有多普勒频移的时间相干瑞利衰落信道.系统参数,数据帧时间长度取 $T_s=1\text{ ms}$,多普勒频移 $f_d=50\text{ Hz}$,调制方式采用QPSK,码书为Grassmann码书,码书大小为4 bit,接收端信道估计和反馈无误差.需要指出的是,在进行信道预测时,为避免预测误差的积累与传递,参考式(3),根据信道矩阵的相关性,向前选取合适的预测阶数及预测范围.随着数据帧时间间隔的增加,其信道矩阵的相关性减小,预测误差随之增大,故预测阶数和预测范围不宜过大.由于仿真中多普勒频移 $f_d=50\text{ Hz}$,选取相关性较强的前4帧信道矩阵作为预测矩阵,即AR预测阶数 $m=4$,同理,共用数据帧个数取 $B=2$ 和 $B=4$,分别仿真验证.

图2为不同反馈方法与数据帧数的仿真图.由于未知CSI无反馈,且已知CSI为理想情况,故仿真中这两种情况无法实现,仅对笔者所提方法

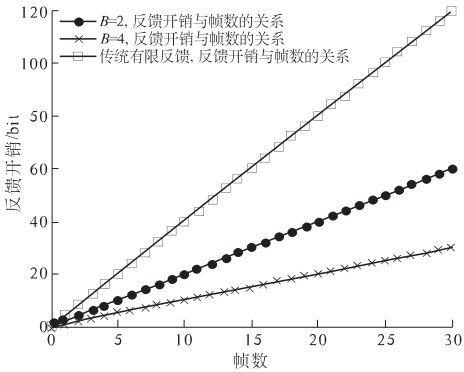


图2 反馈方法与数据帧数的关系
Fig.2 Relationships of feedback methods and data frames

与传统反馈方法的反馈开销进行比较.由图2可见,传统方法每帧数据反馈一个码字,反馈开销大,而本文方法 B 个数据帧反馈一个码字,反馈开销成倍减小.与传统有限反馈方法的每帧一个码字,即4 bit(假定码书大小为4 bit)反馈量相比,笔者提出的反馈方法可以有效降低反馈速率,当 $B=2$ 时,每帧平均反馈比特数为2 bit, $B=4$ 时,每帧平均反馈比特数为1 bit.

图3为数据帧数 $B=2,4$ 时平均信道容量与未知CSI、已知CSI以及传统有限反馈方法的信道容量的仿真.图4和图5分别为数据帧数 $B=2$ 和 $B=4$ 时的误码率仿真.其中, $B=2$,就是2个时间相干的数据帧共用1个波束成形向量, $B=4$ 亦然.在图3~5中,随着数据帧数 B 的增加,系统的平均信道容量在减少,误码率在增大,这是因为在接收端,传统方法每帧数据均要反馈一次,而本文方法 B 帧数据反馈一次,且反馈的波束成形向量为CSI的预测值,同时 B 帧数据共用一个最优值,所以本文反馈方法的实时性和精确性略逊于传统方法.但是反馈量却降低为传统反馈量的 $1/B$.与反馈开销的大幅降低相比,这点系统性能的损失是可以接受的.

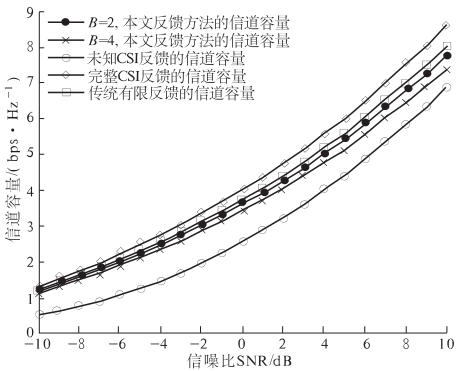


图3 不同反馈方法的信道容量
Fig.3 Channel capacities of different feedback methods

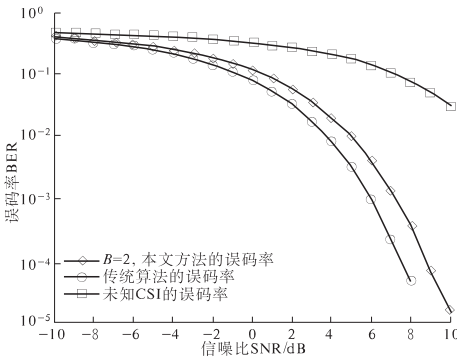
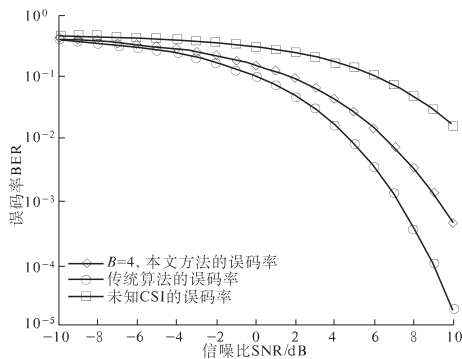


图4 数据帧数 $B=2$ 时的误码率
Fig.4 The BER of data frame number $B=2$

图5 数据帧数 $B=4$ 时的误码率Fig.5 The BER of data frame number $B=4$

4 结论

笔者充分挖掘了时间相关 MIMO 信道下信道矩阵的相关性,以 AR 预测模型预测信道,并在此基础上,利用信道相关系数,找出多个数据帧中的最优量化信道矩阵,最终从码书中得出最优码字反馈给发送端,用于多个数据帧的发射波束成形,从而实现基于信道预测的有限反馈方法.仿真结果表明,该方法虽然会降低系统性能,但却可以有效减少反馈开销,降低反馈速率,使反馈速率和系统吞吐量之间达到很好的折中.此外,本文信道预测方法还可降低由于反馈时延对系统性能造成的不良影响.

参考文献:

- [1] 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 (10): 54 - 59.
- [2] PENG Dong, TANG Wan-bin, WANG Lian. A Novel linear precoding based on limited feedback for MIMO systems [C]//IEEE International Conference on Communications, Circuits and Systems. Milpitas:IEEE Press,2009.
- [3] 董时菊,王海波,刘寅生. 利用 TDD 信道互易性和现有 LTE 帧结构实现信道预测 [J]. 电信科学, 2011, (6):68 - 73.
- [4] JINDA N. MIMO broadcast channels with finite rate feedback [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(11): 5045 - 5059.
- [5] YAN C, KAYAMA H. Limited feedback scheme using constant amplitude codebook for tomlinson-harashima precoding in multi-user MIMO systems[C]//IEEE International Conference on Communications. Kyoto: IEEE Press, 2011.
- [6] 廖国锐,谢明泽. MIMO 系统在慢衰落信道中的实用反馈方案[J]. 电讯技术, 2009,49(12):20 - 24.
- [7] CHO Y S, KIM J, YANG W, et al. MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB [M]. New York:John Wiley & Sons(Asia) Pte Ltd, 2010.
- [8] WANG Jiao, NI Zhi. Statistical properties analysis of improved Jakes' fading channel model [C]//IEEE Military Communications, Boston: IEEE Press, 2003: 1392 - 1396.
- [9] HUANG K, MONDAL B, HEATH R W, et al. Multi-antenna limited feedback for temporally correlated channels: feedback compression [C]//Global Telecommunications Conference. San Francisco: IEEE Press, 2006: 1 - 5.
- [10] 王选朝,张静,李莉,等. 无线瑞利衰落信道的自回归模型研究[J]. 电子科技,2010,23(10):65 - 68.

A New Limited Feedback Approach Based on Channel Prediction over Temporally-correlated Channels

FAN Wen-bing, GUO Yun, WANG Zhen-yi, MENG Xiao-chao, JI Gang

(School of Information and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In view of the problem of the temporal redundancy in temporally-correlated MIMO channels, a new limited feedback approach based on channel prediction is proposed in this paper. Both the temporal coherence of the adjacent data frames and AR prediction model are used to predict channel state information and find an optimal codeword which is utilized to get an integrated optimal system performance of data frames and feedback it to sender. The simulation results show, while the system performance of the feedback approach proposed has decreased compared with the traditional one, but the feedback costs are significantly reduced, so the performance loss is acceptable.

Key words: MIMO; temporally-correlated; limited feedback; AR model