

一种基于空间相关MIMO系统的鲁棒接收机

吴丽娟¹, 方舒²

(1. 成都信息工程学院通信工程系 成都 610225; 2. 北京邮电大学无线新技术研究所 北京 海淀区 100876)

【摘要】针对空间相关性中存在严重制约MIMO系统性能的问题,提出了一种具有鲁棒性的空间相关MIMO系统的接收方案。在发送端采用Alamouti编码以提高发射分集,接收端则将信道传输矩阵进行重建后,利用V-BLAST分层排序干扰抵消算法进行检测。仿真结果表明该方案在保证系统吞吐量和频谱利用率的同时,较之传统V-BLAST接收方案,具有更强的抗空间相关性能力,且复杂度较低。

关键词 多输入多输出; 空间相关性; 垂直-贝尔实验室分层空时结构; STRCM
中图分类号 TN911 文献标识码 A

A Robust Detection Scheme for Spatial Correlated MIMO Systems

WU Li-juan¹, FANG Shu²

(1. School of Communication Engineer, Chengdu University of Information Technology Chengdu 610225;
2. Wireless Tech. Innovation Institute, BeiJing University of Posts and Telecommunications Haidian Beijing 100876)

Abstract The existence of spatial correlation will severely degrade the performance of MIMO systems, we propose an algorithm called Space Time Robust to Correlated MIMO (STRCM) that Alamouti's code is utilized to obtain the transmit diversity, V-BLAST order interference cancellation detection is adopted in the receiver directly via the grouping and reconstruction of channel matrix. Simulations show that the proposed scheme is more robust to spatial correlation than V-BLAST, and the complexity is not increase.

Key words multiple input multiple output; spatial correlation; V-BLAST; STRCM

富散射(Rich-Scatter)环境下,多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术可以有效地提高频谱利用率。贝尔实验室采用V-BLAST结构的MIMO系统模型在室内环境下取得20~40 b·s⁻¹/Hz的频谱利用率^[1]。然而在实际传输信道环境中,由于传播环境、天线阵元放置以及天线周围散射体分布会导致各子信道间存在空间上的相关性,这种相关性的存在严重制约了MIMO系统的容量和误码性能^[2-3]。

已有的一些研究验证:空间分集(STBC)较之空间复用(V-BLAST)技术对空间相关性具有更好的鲁棒特性,但其频谱效率会降低^[4]。文献[5]基于该特点,提出了一种空间相关性信道下STBC+V-BLAST的MIMO接收策略:在发送端采用Alamouti编码,接收端将信道进行分组,通过构造满足2×2 Alamouti结构的子信道传输矩阵,最后采用迫零检测。该方案有效地降低了系统的复杂度,具有良好的抗空间相关特性。事实上,文献[5]提出的这种解相关迫零检测在消除相邻天线间干扰的同时,放大了背景噪声。

针对该问题,本文设计了一种新的空时处理对抗空间相关性接收策略(STRCM)。

1 空间相关性MIMO信道模型

假设系统有 M_T 个发射天线和 M_R 个接收天线,平坦独立衰落MIMO信道传输矩阵可表示为:

$$H_w = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{21} & \cdots & H_{1M_T} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2M_T} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H_{M_R1} & H_{M_R2} & \cdots & H_{M_R M_T} \end{bmatrix} \quad (1)$$

收稿日期: 2006-06-15

作者简介: 吴丽娟(1974-),女,讲师,主要从事通信理论与技术方面的研究;方舒(1981-),女,博士生,主要从事宽带无线通信技术方面的研究。

式中 $H_{i,j}$ 是第 j 个发射天线到第 i 个接收天线的信道冲激响应。在实际的无线传输系统中, 信道的相关系数往往是相关的。不失一般性, 本文采用相关矩阵建模方法进行空间相关性MIMO信道建模^[6]。空间相关性的平坦衰落MIMO信道为:

$$\text{vec}(\mathbf{H}) = \mathbf{R}^{1/2} \text{vec}(\mathbf{H}_w) \quad (2)$$

式中 $\text{vec}(\mathbf{H}_w)$ 表示将 \mathbf{H}_w 的所有列依次排列起来构成一列; $\mathbf{R} \Delta \mathbf{R}_t \otimes \mathbf{R}_r$ 表示信道相关性的控制矩阵, 它可由发送相关矩阵 \mathbf{R}_r 与接收相关矩阵 \mathbf{R}_t 的Kronecker积来构成^[6]:

$$\mathbf{R}_t = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1M_r} \\ \rho_{21} & 1 & \cdots & \rho_{2M_r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{M_r1} & \rho_{M_r2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1M_r} \\ \rho_{21} & 1 & \cdots & \rho_{2M_r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{M_r1} & \rho_{M_r2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $\rho_{i,j}$ 表示第 i 和第 j 个天线间的相关系数; \otimes 为Kronecker积。

2 文献[5]算法概述

文献[5]里对信道矩阵 \mathbf{H} 及发送信号 s 进行分块操作, 即:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{式中 } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} h_{13} & h_{14} \\ h_{23} & h_{24} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} h_{31} & h_{32} \\ h_{41} & h_{42} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} h_{33} & h_{34} \\ h_{43} & h_{44} \end{bmatrix}。$$

$$s_{12} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2^* \\ s_2 & -s_1^* \end{bmatrix}, \quad s_{34} = \begin{bmatrix} s_3 & s_4^* \\ s_4 & -s_3^* \end{bmatrix} \quad (5)$$

接收信号同样进行分块操作

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{n} = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ y_5 & y_6 & y_7 & y_8 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 \\ \mathbf{Y}_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 $\mathbf{Y}_1 = \begin{bmatrix} y_1 & y_5 \\ y_2 & y_6 \end{bmatrix}$, $\mathbf{Y}_2 = \begin{bmatrix} y_3 & y_7 \\ y_4 & y_8 \end{bmatrix}$ 。经上述定义, 容易得到如下表达式:

$$\mathbf{Y}_1 = \mathbf{A}s_{12} + \mathbf{B}s_{34} + \mathbf{W}_1, \quad \mathbf{Y}_2 = \mathbf{C}s_{12} + \mathbf{D}s_{34} + \mathbf{W}_2 \quad (7)$$

式中 \mathbf{W}_1 、 \mathbf{W}_2 分别是加在 \mathbf{Y}_1 、 \mathbf{Y}_2 上的噪声矢量。为了处理 s_{12} 和 s_{34} , 引入 z_1 及 z_2 为:

$$\begin{cases} z_1 = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{Y}_1 - \mathbf{D}^{-1}\mathbf{Y}_2 = (\mathbf{B}^{-1}\mathbf{A} - \mathbf{D}^{-1}\mathbf{C})s_{12} + \mathbf{B}^{-1}\mathbf{W}_1 - \mathbf{D}^{-1}\mathbf{W}_2 \\ z_2 = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{Y}_1 - \mathbf{C}^{-1}\mathbf{Y}_2 = (\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B} - \mathbf{C}^{-1}\mathbf{D})s_{34} + \mathbf{A}^{-1}\mathbf{W}_1 - \mathbf{C}^{-1}\mathbf{W}_2 \end{cases} \quad (8)$$

$$z_1 = \begin{bmatrix} h'_{11} & h'_{12} \\ h'_{21} & h'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 & s_2^* \\ s_2 & -s_1^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 & n_3 \\ n_2 & n_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y'_1 & y'_3 \\ y'_2 & y'_4 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \tilde{s}_1 = h'_{11} s_1 + h'_{21} s_2^* - h'_{12} s_2 - h'_{22} s_1^* = (|h'_{11}|^2 + |h'_{12}|^2 + |h'_{21}|^2 + |h'_{22}|^2) s_1 + \mathbf{N}_1 \\ \tilde{s}_2 = h'_{12} s_1 + h'_{22} s_2^* + h'_{11} s_2 - h'_{21} s_1^* = (|h'_{11}|^2 + |h'_{12}|^2 + |h'_{21}|^2 + |h'_{22}|^2) s_2 + \mathbf{N}_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中 \mathbf{N}_1 和 \mathbf{N}_2 分别表示合并后的噪声矢量。根据式(10), 即可解出发送信号 s_1 和 s_2 , 同理可以解出 s_3 和 s_4 。

3 STRCM算法描述

本文提出的STRCM算法, 在发射端与文献[5]相同: 发端天线两两一组, 采用Alamouti正交编码, 经编码后的矩阵行为空间维, 列为时间维。因此, $M_T \times M_R$ 的MIMO系统, 经过Alamouti编码后的发射信号可表示为:

$$\mathbf{x}^T = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & \cdots & s_{M_T-1} & s_{M_T}^* \\ s_2^* & -s_1 & \cdots & s_{M_T} & -s_{M_T-1}^* \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 $s_n (n=1, 2, \dots, M_T)$ 表示经调制后的发射信号; $(\cdot)^T$ 、 $(\cdot)^*$ 分别记为转置及复共轭。

假设信道是平坦准静态衰落(在两个连续的符号间隔内信道响应不变), 则接收信号表示为:

$$y = \mathbf{H}x + n \tag{12}$$

式中 \mathbf{H} 为式(2)中的相关信道矩阵; n 为服从 $N_c(0, \sigma^2 \mathbf{I})$ 的复高斯噪声。在STRCM算法中, 最重要的是如何在接收端对信道矩阵进行重构。文献[5]的重构是基于充分利用 2×2 Alamouti 矩阵求逆简单的特点, 对信道矩阵进行分组重构。而本文力图采用经典的分层排序干扰抵消的非线性手段, 进一步提高系统的抗空间相关性能力。不妨将信道矩阵重构为:

$$\tilde{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} h_1^1 & h_2^1 & \cdots & h_{M_T-1}^1 & h_{M_T}^1 \\ -(h_2^2)^* & (h_1^2)^* & \cdots & -(h_{M_T}^2)^* & (h_{M_T-1}^2)^* \end{bmatrix} \tag{13}$$

式中 h_n^i 表示信道矩阵 \mathbf{H} 在第 $i(i=1,2)$ 时刻的第 n 列, 则此时的接收信号仍保持式(12)的形式:

$$\tilde{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1^1 & h_2^1 & \cdots & h_{M_T-1}^1 & h_{M_T}^1 \\ -(h_2^2)^* & (h_1^2)^* & \cdots & -(h_{M_T}^2)^* & (h_{M_T-1}^2)^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & \cdots & s_{M_T} & s_{M_T-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2^* \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{H}}s + \tilde{n}^T \tag{14}$$

式中 $s = [s_1 \ s_2 \ \cdots \ s_{M_T}]^T$ 。式(14)的求解过程, 实际是接收机依据某种准则设计线性变换矩阵 \mathbf{G} , 从接收信号中恢复发送信息的过程:

$$\hat{s} = \mathbf{G}\tilde{y} \tag{15}$$

目前主要存在两种准则: 迫零(ZF)及最小均方误差(MMSE)^[7]。(1) 在ZF准则中, 变换矩阵满足 $\mathbf{G} = (\mathbf{H}^* \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^*$; (2) 在MMSE准则中, 变换矩阵 $\mathbf{G} = (\mathbf{H}^* \mathbf{H} + \sigma^2 \mathbf{I}/p)^{-1} \mathbf{H}^*$ 。其中 $(\cdot)^{-1}$ 记为矩阵求逆; p 为单个发射天线的发送功率; σ^2 表示噪声方差。文献[5]最后对接收信号的求解过程实质上就是基于ZF准则的解相关检测, 这种处理会造成在消除相邻天线间干扰的同时, 放大了背景噪声, 进而影响系统性能。基于此, 同时为了更好地与文献[5]进行对比, 本文采用基于ZF准则的V-BLAST分层排序干扰抵消(SIC-ZF)的方式对式(14)进行检测^[1]。

4 仿真结果与性能分析

本节采用Matlab[®]作为仿真平台进行算法验证, 给出了V-BLAST、文献[5]及STRCM算法在空间相关窄带MIMO系统中的误比特率(BER)性能曲线, 同时比较了文献[5]与STRCM算法的吞吐量。仿真中采用如下假定: 发射及接收天线数均为4; 信道噪声为加性高斯白噪声; 信道多普勒频移为20 Hz; 出于简化仿真, 不妨假设发送端各天线间相关系数及接收端各天线间的相关系数均相同。

图1给出了STRCM算法与采用SIC-ZF的V-BLAST在不同空间相关系数MIMO系统中的BER曲线对比。其中V-BLAST采用QPSK调制, STRCM算法采用高阶的16QAM, 保持了相同频谱利用率的仿真条件。由图1中可见, 频谱效率相同时, STRCM算法在不同空间相关系数MIMO系统中的BER性能都优于传统V-BLAST算法性能, 这说明在发送端采用STBC空间分集技术可有效地提高接收机的抗空间相关性能力。

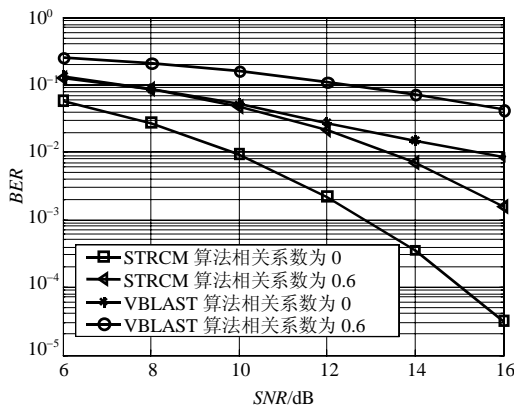


图1 STRCM与V-BLAST算法BER曲线性能对比

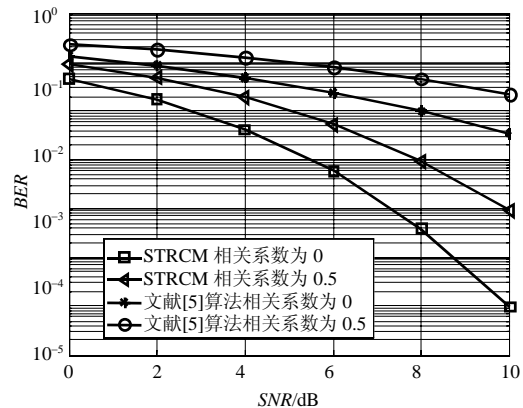


图2 STRCM与文献[5]算法BER曲线性能对比

图2则给出了STRCM与文献[5]算法在各相关系数不同的空间相关信道下的BER性能对比。此时发端均采用QPSK调制。从图中可以清楚地看到,本文提出的STRCM算法较之文献[5]的BER性能,在相同仿真条件下有明显提高,原因就在于直接解相关ZF检测放大了背景噪声。

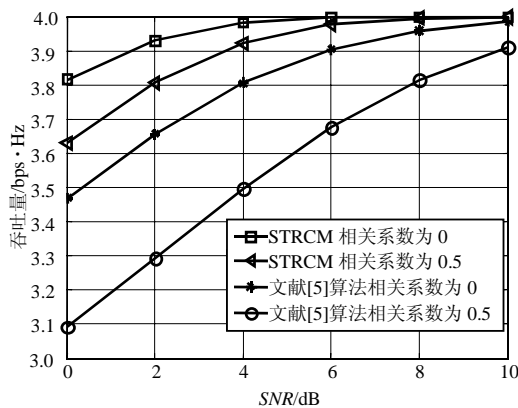


图3 STRCM与文献[5]算法在相关性信道下吞吐量比较

图3最后给出了STRCM及文献[5]算法在空间相关信道下的吞吐量(Throughput: 单位带宽和单位时间内正确传输的比特数, 单位为 $\text{b}\cdot\text{s}^{-1}/\text{Hz}$)曲线。在相同仿真条件下, STRCM系统的吞吐量在相关系数分别为0和0.5时都优于文献[5]在相关系数为0时的吞吐量, 由于两种算法的频谱效率相同, 所以当信噪比较高时, 两者的吞吐量逐渐靠近, 但本文的STRCM能更迅速的逼近 4×4 MIMO系统的容量。

5 结束语

由上述仿真可见, 本文针对空间相关MIMO系统, 提出了一种鲁棒性的空时接收策略STRCM。该接收方案在发端采用STBC技术以提高系统发射分集, 在收端则在将传输矩阵进行合理重构后, 利用V-BLAST分层排序干扰抵消算法, 在消除天线间干扰的同时, 有效地抑制了背景噪声。从而在保持较高频谱利用率和系统吞吐量的同时, 较之传统只采用V-BLAST方案及文献[5]的接收方案, 具有更优的抗空间相关性能力。而且检测的复杂度较低, 几乎与传统V-BLAST检测复杂度相同。

参 考 文 献

- [1] Wolniansky P W, Foschini G J, Golden G D, et al. V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over rich scattering wireless channel[C]// Int. Symp, Signals Sys, Electron, 1998, 295-300.
- [2] Jorswieck E A, Sezgin A. Impact of spatial correlation on the performance of orthogonal space-time block codes[J]. Comm. Lett., 2004, 8(1): 21-23.
- [3] 黄 成. 数字中频软件无线电接收系统的实现方案[J]. 实验科学与技术, 2006,4(4): 15-17.
- [4] Tarasak P, Hlaing M, Bhargava V K. Linear prediction receiver for differential space-time block codes with spatial correlation[J]. Comm. Lett., 2003, 7(11): 543-545.
- [5] Zhao L, Dubey V K. Transmit diversity and combining scheme for spatial multiplexing over correlated channels[J]. IEEE VTC, 2004, 1: 380-383.
- [6] Oestges C, Clerckx B, Janvier D V. Impact of diagonal correlations on MIMO capacity: application to geometrical scattering models[J]. IEEE VTC, 2003, 1: 394-398.
- [7] Wubben D, Bohnke R, Rinas J, et al. Efficient algorithm for decoding layered space-time codes[J]. Electron. Lett., 2001, 37(22): 1348-1350.

编 辑 刘文珍