

V-BLAST的并行译码

陶小峰,俞追专,秦海燕,张平

(北京邮电大学无线新技术研究室,北京 100876)

摘要: 移动通信系统研究的热点之一是提高系统容量.因此,空时码技术因其可在衰落环境下提供高质量的信号,进而提高系统容量而在无线通信中得到了广泛的研究.最近几年,对空时码中的一个重要分支——垂直-贝尔实验室分层空时码(V-BLAST)的研究已经有很多.然而,传统的V-BLAST算法由于需要进行大量的线性迫零和串行符号删除等运算,时延很大.而且发射天线数越多,时延也就越大.针对上述问题,本文提出了一种新的基于线性迫零和并行符号删除的检测算法.其优点是时延小且结构简单.对于新的译码方案我们在COSSAP中平坦瑞利信道下进行了仿真,仿真结果显示了基于并行符号删除的新方案的误码率(BER)性能.

关键词: 多输入多输出;空时码;分层空时码;BLAST

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2003)07-0990-04

Parallel Detection Algorithm of V-BLAST

TAO Xiao-feng, YU Zhui-zhuan, QIN Hai-yan, ZHANG Ping

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Wireless Technologies Innovation Lab, Beijing 100876, China)

Abstract: To improve system capacity is always a hotspot in mobile communication systems. Therefore, space-time code techniques have been widely studied in wireless communications, for they provide better signal qualities in fading channel environments and increase system capacity. As an important space-time code, Vertical Bell lab Layered Space-Time (V-BLAST) code has been paid much attention in recent years. However, traditional detection algorithm of V-BLAST needs much time in performing linear nulling and successive symbol cancelling. The more the number of transmit antennas are, the more the process time delay is. Aiming in solving this problem, a new scheme based on linear nulling and parallel symbol cancellation is proposed in this paper. The new scheme is of less time delay and simpler detection structure. And the simulation results of new scheme are obtained by COSSAP simulation in flat Rayleigh channels. These simulation results are presented to verify the BER performance of new scheme based on parallel symbol cancellation.

Key words: MIMO; space-time code; layered space-time code; BLAST

1 引言

当前随着移动用户的增多以及人们对移动通信业务的追求已从单纯的语音业务扩展到多媒体业务,频谱资源显得日趋紧张.因此追求尽可能高的频谱利用率已成为并且在今后仍然是一个充满挑战的问题.这种挑战使得人们努力开发高效的编码、调制以及信号处理技术来提高无线频率的效率.而近年来提出多输入多输出(MIMO)系统就是能够有效提高无线频谱利用率最重要的方案之一.与传统的单发射单接收天线系统不同,MIMO系统使用多根发射、多根接收天线,在系统容量、频谱效率、发射机和接收机的设计上都有很大的差别.文献[1]、[2]对MIMO系统的容量进行了研究.分析表明,MIMO系统频谱利用率可达20-40bps/Hz,频谱利用率非常高.在MIMO系统的研究之中,Foschini等^[3]提出了MIMO系统

的重要分支分层空时码(LST).随后Darshan Shiu, Joseph M. Kahn^[4,5]等在分层空时码上做了很多工作.1998年Wolniansky, Foschini, Golden, 和Valenzuela^[6]提出一种分层空时码的系统模型——垂直-贝尔实验室分层空时码(V-BLAST).随着V-BLAST系统的出现,人们对MIMO系统尤其是对子集空时码系统的研究进入了一个崭新的时期.文献[7]对空时码系统的各个分支做了介绍及分析.而在文献[8]中,Golden提出了V-BLAST检测算法,其算法特点是基于串行删除译码.然而在Golden的分层空时码串行删除译码算法中,需要M(发射天线数)次对信道矩阵求伪逆,每次得出一个迫零向量.而且每次求伪逆后还要进行排序操作.在发射天线数比较多的情况下,算法的复杂度很高.基本上难以实现.为了降低算法的复杂度,很多研究者作出了努力.针对其运算瓶颈(迫零和串行删除),文献[9]提出了所谓的BLAST平方根算法,复杂度得到了

收稿日期:2001-12-17;修回日期:2002-12-17

基金项目:国家863计划项目(No. 2001AA123016)

一定程度的降低,但离实现仍有一定的距离.文献[10]提出 V-BLAST 并行译码算法,并对该算法作了初步研究,但缺乏对 Golden 串行算法和并行算法的性能比较,以及对两种算法应用环境的分析.

本文首先简要介绍 V-BLAST 的串行译码及优缺点;然后提出多级并行译码算法;并给出多级并行译码的性能及 V-BLAST 串并行译码的性能比较;最后为全文的小结.

文中涉及各符号的含义如下: $a = (a_1, a_2, \dots, a_M)^T$ 为发射信号列向量,其中 $a_i, i = 1, 2, \dots, M$ 为复信号; $H = (h_{ij})_{N \times M}$ 为信道转移矩阵,其中 $h_{ij}, i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, M$ 为复矩阵元素,表示第 j 根发射天线到第 i 根接收天线的信道转移特性; H_j 代表 H 的第 j 列; $G = H^+$ 代表 H 的 Moore-Penrose 伪逆; H_{k_i} 表示 H_{k_i} 去掉第 k_i 列后剩余的列重新构成的矩阵; $w_i^T = G_i$ 为 G 的第 i 行; $(\cdot)^T$ 表示矩阵的转置; $(\cdot)^H$ 表示矩阵的共轭转置; $(\cdot)^+$ 表示矩阵的 Moore-Penrose 伪逆; $(\cdot)^{-1}$ 表示非奇异阵的逆; $Q(\cdot)$ 表示判决操作.

2 V-BLAST 分层空时码的基本结构及串行译码

2.1 V-BLAST 分层空时码的基本结构

设有一个 M 根发射天线、 N 根接收天线的 V-BLAST 系统.发射信号为: $a = [a_1, a_2, \dots, a_M]^T$,接收信号为 $r = [r_1, r_2, \dots, r_N]^T$,信道特性矩阵为 $H = (h_{ij})_{N \times M}$,则有:

$$r = Ha + n \tag{1}$$

其中 $n = [n_1, n_2, \dots, n_N]^T$ 为复高斯白噪声.

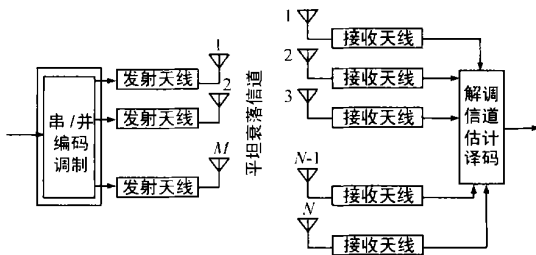


图 1 V-BLAST 分层空时码的基本结构

为了节省篇幅, V-BLAST 系统编码器结构请参见文献[3~7]。因为 $G = H^+$, $w_i^T = G_i$, 所以有:

$$w_i^T \cdot H_j = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \tag{2}$$

2.2 V-BLAST 串行译码算法

为了便于读者的理解和比较以及便于推导 V-BLAST 的并行译码算法,这里首先总结 GD Golden 的 V-BLAST 串行译码算法,其算法如下(本节未定义符号请参见文献[8]):

(1) 初始化:

$$i = 1 \tag{3a}$$

$$G^1 = H^+ \tag{3b}$$

$$k_1 = \arg \min_j (G^1)_j^2 \tag{3c}$$

(2) 迭代:

$$w_{k_i}^T = (G^i)_{k_i} \tag{3d}$$

$$y_{k_i} = w_{k_i}^T r_i \tag{3e}$$

$$\hat{a}_{k_i} = Q(y_{k_i}) \tag{3f}$$

$$r_{i+1} = r_i - \hat{a}_{k_i} (H_{k_i}) \quad (\text{初始化时: } r_1 = r) \tag{3g}$$

$$G^{i+1} = (H_{k_i})^+ \tag{3h}$$

$$k_{i+1} = \arg \min_j (G^{i+1})_j^2 \tag{3i}$$

$$i = i + 1 \tag{3j}$$

由式(3)可知, GD Golden 算法有以下特点:

对信道矩阵 H 或更新后的信道矩阵 H_{k_i} 求 Moore-Penrose 伪逆,共 M 次;

对所求得的伪逆矩阵中的行向量按其范数大小进行 M 次排序;

串行译码.

该算法采取线性迫零和串行干扰删除(串行符号删除),与多用户检测中的串行干扰删除相似,时延大;而且需采用 M 次求伪逆运算, M 次排序运算,复杂度非常高.图 2 示意了 G.D. Golden 算法的流程.

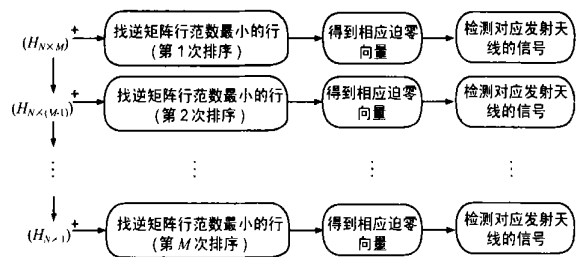


图 2 GD Golden 算法流程图

3 V-BLAST 并行译码

考虑到 V-BLAST 串行有序译码算法排序运算复杂度高、时延大的缺陷,同时受到并行干扰删除器的启发,作者首次提出一种新的 V-BLAST 译码算法——并行译码算法.

3.1 V-BLAST 并行译码的原理

图 3 是 V-BLAST 并行译码的原理框图.其核心是由 M 个迫零单元和并行干扰删除单元组成,通过一级或多级并行干扰删除得到 M 根发射天线信号的估计值.

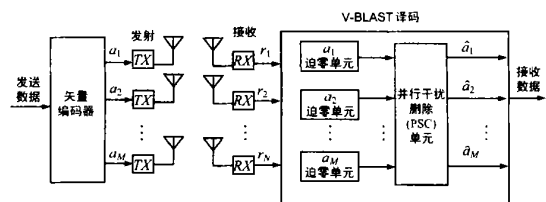


图 3 V-BLAST 并行译码的原理框图

3.2 V-BLAST 并行译码的算法流程

(1) 初始化:

$$k = 1 \tag{4a}$$

$$G = H^+ \tag{4b}$$

$$y_0 = G \cdot r \tag{4c}$$

$$\hat{a}_{m,0} = Q(y_{m,0}), \quad m = 1, 2, 3, \dots, M \tag{4d}$$

(2) 迭代:

$$r_{m,k} = r - \sum_{l=1, l \neq m}^M \hat{a}_{l,k-1}(H)_l, m=1,2,3, \dots, M \quad (4e)$$

$$y_{m,k} = G_m \cdot r_{m,k}, \text{ 其中 } G_m = (H_m)^+ \quad (4f)$$

$$\hat{a}_{m,k} = Q(y_{m,k}) \quad (4g)$$

$$k = k + 1 \quad k \text{ 表示干扰删除的级数} \quad (4h)$$

在程序的初始化阶段,通过对全部 M 根发射天线进行迫零(ZF)运算得到 $y_0 = [y_{1,0}, y_{2,0}, \dots, y_{M,0}]$,经过判决得到发射信号的初始估计值 $\hat{a}_{m,0} (m=1,2,3, \dots, M)$.在此基础上进行并行干扰删除(PIC)处理,即先恢复出对第 $m (m=1,2,3, \dots, M)$ 根发射天线信号所受的干扰

$$\sum_{l=1, l \neq m}^M \hat{a}_{l,k-1}(H)_l, \text{ 再删除此}$$

干扰得到 $r_{m,k} = r - \sum_{l=1, l \neq m}^M \hat{a}_{l,k-1}(H)_l$, 从而通过计算 $G_m \cdot r_{m,k}$ 可得第 m 根发射天线信号判决前的值 $y_{m,k}$, 判决后得估计值 $\hat{a}_{m,k}$. 重复该过程可计算全部 M 根发射天线信号的估计值.

上述干扰删除过程可以重复多次,从而实现基于多级 PIC 或多级串行符号删除(PSC)的 V-BLAST 并行译码.和 G. D. Golden 的算法相比,该算法不需要排序操作,不需要多次求伪逆操作,因而能降低原算法的复杂度.图 4 给出了基于 V-BLAST 的并行译码算法流程示意图.

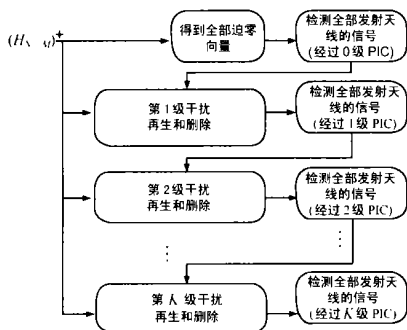


图 4 基于 V-BLAST 的并行译码算法流程示意图

4 算法仿真及结果分析

作者设计了以下 COSSAP 仿真.

首先是三级 V-BLAST 并行译码算法性能仿真.其中线性迫零是作者所提新算法和 G. D. Golden 算法的共同基础.然后,为了较为充分地显示 V-BLAST 并行译码算法的性能及应用环境,作者分别设计了不同帧长环境的仿真.表 1 给出了图 5、图 6 的仿真条件,不同的是图 5 是基于理想信道估计,图 6 基于非理想信道估计.

信道	平坦瑞利信道
发射天线数	8
接收天线数	12
载波频率	1.9GHz
车速	10m/s
符号速率	24.3 千符号/秒

图 5 为 V-BLAST 多级并行译码与串行译码的性能比较,其中零级 PSC 实质上只经历了迫零运算.仿真结果表明:零级 PSC 性能最差;一级 PSC 的性能优于一级不排序的 SSC,但较一级排序的 SSC(G. D. Golden 算法)差;V-BLAST 多级并行译码算法性能较好,但第三级干扰删除几乎没有性能改善.图 6 为不同帧长条件下, V-BLAST 的串行译码和并行译码的性能

比较.它显示:在信噪比较低的环境下,并行译码的性能优于串行译码;反之,串行译码的性能优于并行译码;所以,两个算法的性能曲线存在一个交叉点.而且帧长越长,交叉点向右移,即作者所提新算法适应范围越大.这是因为在信道环境比

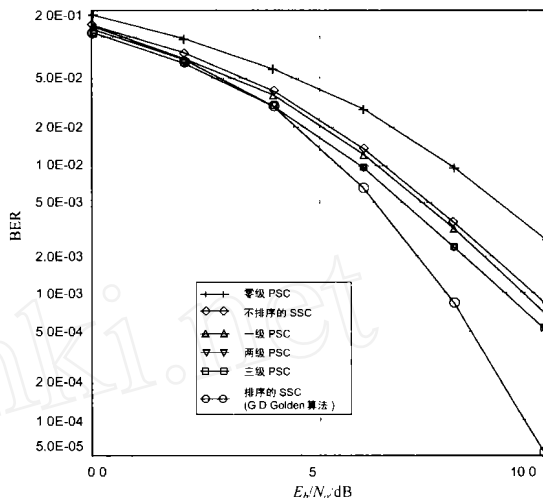


图 5 V-BLAST 多级并行译码与串行译码的性能比较

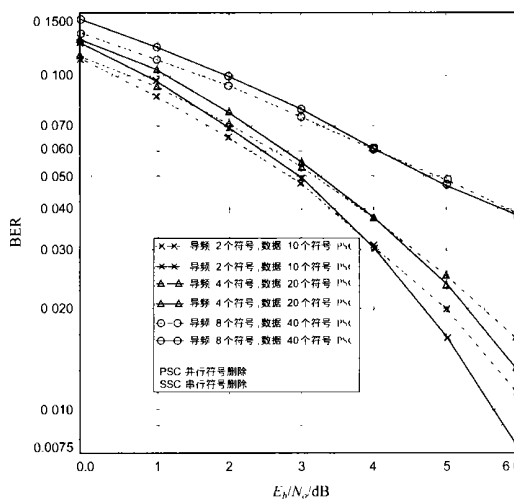


图 6 不同帧长条件下, V-BLAST 的串行译码和并行译码的性能比较.较差劣时,噪声的影响使得 G. D. Golden 算法中的排序操作的准确性受到了很大恶化而导致算法性能下降;帧长越长,根据导频部分得到的数据部分的信道特性与真实信道特性会存在较大误差,这也会影响 G. D. Golden 算法中的排序操作的准确性.可见, G. D. Golden 的串行译码算法和作者所提的并行译码算法各有适应范围,就像多用户检测领域的串行干扰删除和并行干扰删除一样.但是作者所提的算法在时延和计算复杂度上有非常大的优势.

5 结论

空时码作为 MIMO 系统的一个重要分支,无疑是当今研究的热点.对于 V-BLAST 分层空时码的译码, G. D. Golden 的译码算法复杂度非常高, M 次求伪逆运算, M 次排序运算.时延很大,相当于 M 个用户的串行删除.其后的改进算法基本

上还是基于串行删除且复杂度高. 本文采用另一种思维用并行译码方法, 并行译码算法是解决 G. D. Golden 算法问题的尝试. 其复杂度非常低, 1 次求伪逆运算, 0 次排序运算. 时延很小, 相当于 M 个用户的并行删除. 在某些情况下, 特别是信道环境较差或信道估计不准确时, 在一定的 E_b/N_0 之下, 其性能反而优于复杂度高时延大的串行译码算法 (Golden 算法). 因此就作者所能判定的而言, 在将来的具体应用中, 应根据具体的应用环境选择使用串行或并行译码算法.

作者感谢审稿人的辛勤工作, 同时也感谢西门子公司 Schulz Egon 博士、Hass Harald 博士以及 Costa Elena 博士的支持和帮助.

参考文献:

- [1] GJ Foschini ,MJ Gans. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas [J]. Wireless Personal Communications 6 ,1998 ,6(3) :311 - 335.
- [2] C-N Chuah ,GJ Foschini ,et al. Capacity growth of multi-element arrays in indoor and outdoor wireless channels [A]. Proc of IEEE WCNC 2000 [C]. Chicago ,USA :IEEE ,2000.
- [3] GJ Foschini . Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas [J]. Bell Labs Technical Journal ,autumn 1996 ,1(2) :41 - 59.
- [4] Dar-shan Shiu ,J M Kahn. Layered space-time codes for wireless communications using multiple transmit antennas [A]. ICC 99 [C]. Vancouver ,Canada :ICC ,1999.
- [5] Dar-shan Shiu ,J M Kahn. Scalable layered space-time codes for wireless communications :performance analysis and design criteria [A]. Proc of IEEE WCNC [C]. New Orleans :IEEE ,1999 . 21 - 24.
- [6] P W Wolniansky ,GJ Foschini ,et al. V-BLAST:An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel [A]. URSI International Symposium on Signals ,Systems ,and Electronics ,1998. ISSSE 98 [C]. PISA ,ITALY: ISSSE ,1998.
- [7] 张平 ,陶小峰 ,王卫东 ,雷鸣. 空时码 [J]. 电子学报 ,2000 (11A) : 110 - 113.
- [8] G D Golden ,GJ Foschini ,et al. Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture [J]. Electronics Letters ,1999 ,35(1) :14 - 16.
- [9] Babak Hassibi. An efficient square-root algorithm for BLAST [A]. ICASSP 00 [C]. Istanbul ,Turkey :ICASSP ,2000.
- [10] Tao Xiaofeng ,Costa Elena ,et al. New detection algorithm of V-BLAST space-time code [A]. VTC 2001 [C]. Oct. Atlantic city ,USA :VTC , 2001.

作者简介:



陶小峰 男,1970年5月生于湖北省黄冈县,1993年毕业于西安交通大学电气工程系,获工学学士学位,1999年毕业于北京邮电大学计算机应用专业,获工学硕士学位,现为该校博士研究生,主要从事多用户检测、智能天线、空时码的研究.

俞追专 女,1978年10月生于湖南长沙,2000年毕业于北京邮电大学电信工程学院,获工学学士学位,现为北京邮电大学计算机应用专业工学硕士研究生,主要从事空时码的研究.

秦海燕 女,1978年2月生于北京,2001年毕业于北京邮电大学电信工程学院,获工学学士学位,现为北京邮电大学通信与信息系统专业工学硕士研究生,主要从事空时码的研究.