

双迭代级联译码的 Turbo V-BLAST 结构

胡 旻 尹长川 乐光新

(北京邮电大学数字通信与信息网络研究试验室 北京 100876)

摘要 垂直贝尔实验室分层空时(V-BLAST)方案能有效提高系统的信道容量而成为研究的热点。但多发送天线造成了接收信号的空间干扰,这严重造成了误比特(误帧)系统性能的下降。在接收端,采用了迫零(Zero-forcing)排序的迭代混合干扰消除(Hybrid Interference Cancellation, HIC)算法,相比迫零排序的串行干扰消除(Serial Interference Cancellation, SIC)算法,在降低复杂度的同时提高系统性能。干扰消除后的软信息经过 Turbo 迭代译码,得到的硬判决信息可以反馈回到 V-BLAST 的迭代 ZF-HIC 干扰检测,进行系统级联迭代。因此,文中的 Turbo V-BLAST 结构具有双迭代级联的多迭代环特征。仿真证明能很大程度上改进系统的 BER 和 FER,是一种理想的系统结构。

关键词 Turbo, V-BLAST, 混合干扰消除, 串行干扰消除, 迭代

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)09-1622-04

Double-Iterated Concatenated Decoding for Turbo V-BLAST System

Hu Yang Yin Chang-chuan Yue Guang-xin

(Digital Communication and Information Network Lab, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract Vertical Bell Lab's Layered Space Time (V-BLAST) scheme improves greatly system channel capacity, however multi-transmit antennas introduce space interference, which degrades sharply BER (FER) performance. In order to overcome effectively the space interference, an iterative ordered Zero-Forcing Hybrid Interference Cancellation (ZF-HIC) algorithm is adopted. Compared to conventional Zero-Forcing Serial Interference Cancellation (ZF-SIC) algorithm, ZF-HIC provides better BER and FER performance with a lower computational complexity. Soft-information after ZF-HIC detector is sent to Turbo iterative decoding and the resulting hard decision-information can be sent back to V-BLAST detector again to further update and improve the performance of ZF-HIC detector. So, the Turbo V-BLAST has the double-iterated concatenated decoding structure. The simulation results are presented to verify its advantages.

Key words Turbo, V-BLAST, ZF-HIC, ZF-SIC, Iterative

1 引言

在文献[1]中, Telatar 从信息理论的观点推导出在充分散射的环境中,采用多发多收的天线阵列能大大提高系统的信道容量。在一定条件下,其信道容量随发送天线或接收天线的数目呈线性增长。在文献[2]中, Foschini 论证了分层空时结构(Layered Space-Time Architecture, LSTA)能够得到高的频谱利用率,是多天线阵列实现高频谱利用率的一种有效结构,也称 BLAST 分层结构。在文献[3]中, Wolniansky 等人提出的 V-BLAST 结构是一种有效的 BLAST 结构,然而在实际系统中, V-BLAST 的性能受限于天线间干扰。在文献[4]中, Golden 提出了 V-BLAST 的检测算法,采用迫零排序的串行干扰消除(ZF-SIC)译码,其复杂度大且存在误码判决的传递现象,而系统性能受限于首次干扰消除的判决性能。在文献[5]中, Biglieri 等人提到了基于 MMSE 准则的排序 SIC,更增大了译码的复杂度且需要知道噪声方差。在文献[6]中, Li 等人提出了迫零并行干扰消除(ZF-PIC)算法,大大降低了计算复杂度,但在高信噪比条件下系统性能严重下降。

Turbo 码由于其近香农限的优异性能一经提出就受到广泛的关注和研究。在文献[7]中,首先提出了 Turbo 码的编码和译码结构。由于其通过简单的分量编码器并行级联构造长码,并且分量编码器间引入了交织器,这些都满足了香农信息论论证的达到优异性能的编码要求,即具有随机编码的特点。由于其译码采用基于 MAP 准则的算法,大大提高了译码的性能,其次优的迭代译码由于其复杂度低且性能优异而被广泛采用。Turbo 码优异的性能在于采用软信息译码的思想,软信息可以在整个译码过程中级联使用。这些译码的特点和思想都可以与其他系统级联进行软信息交换来更好地提高系统性能。

本文中,级联 Turbo 信道编码和 V-BLAST 空时分层结构,结合 Turbo 码保证可靠性和 V-BLAST 提高信道容量的优点。其中 V-BLAST 的译码采用迭代 ZF-HIC 算法。本文的目的就是对系统进行全局编码和译码,通过迭代思想达到 V-BLAST 译码和 Turbo 译码的全局优化。本文结构如下,第 2 节是系统描述,包括 Turbo V-BLAST 系统的编码结构和译码结构,以及 MIMO 的信道模型;第 3 节,介绍 ZF-HIC 算法以及系统的双迭代级联结构;第 4 节介绍仿真结果;第 5 节给出了总结。

2 系统描述

2.1 系统发送端结构

采用 Turbo 信道编码和 V-BLAST 空间结构级联, 如图 1。输入数据首先经过 Turbo 编码器编码, 编码后的系统信息和冗余信息经过串并变换, 并经过调制器形成 N (发射天线数目) 层数据流, 然后从各自天线发射出去。

其中, 串/并变换具有交织功能, 例如对于 6 发 6 收的 MIMO 系统, 采用 BPSK 调制, 码率为 1/3 的 Turbo 编码器连续两个时刻的输出序列 $[u_k^s, u_k^{p1}, u_k^{p2}, u_{k+1}^s, u_{k+1}^{p1}, u_{k+1}^{p2}]$ (上标 s 、 $p1$ 和 $p2$ 各代表系统信息和校验信息) 通过串/并变换交织为 $[u_k^s, u_{k+1}^s, u_k^{p1}, u_{k+1}^{p1}, u_k^{p2}, u_{k+1}^{p2}]$ 。

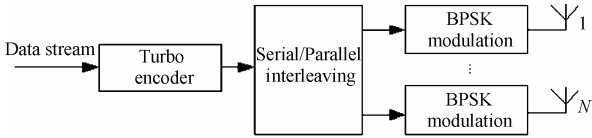


图 1 系统发送端结构

Fig.1 System transmitter structure

2.2 MIMO 信道模型

在 V-BLAST 的 (N, M) 天线阵列中, 一般考虑 $(M \geq N)$, 如图 2 所示。假定系统发射信号为 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N]^T$ ($N \times 1$ 维矢量), 接收信号 $\mathbf{r} = [r_1 \ r_2 \ \dots \ r_M]^T$ ($M \times 1$ 维矢量), $\mathbf{n} = [n_1 \ n_2 \ \dots \ n_M]^T$ ($M \times 1$ 维矢量) 为复高斯白噪声, $\mathbf{H} = (h_{ij})_{M \times N}$ 为平坦瑞利衰落信道转移矩阵, 其中 h_{ij} 代表由发射天线 j 到接收天线 i 的信道转移特性, 满足独立同分布 (i.i.d) 复高斯分布, 均值为 0, 方差为 1。 $(\cdot)^T$ 表示转置。因此 V-BLAST 的接收信号可以表示为

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

在文中, 信道衰落系数在接收端已知, 发送端未知。

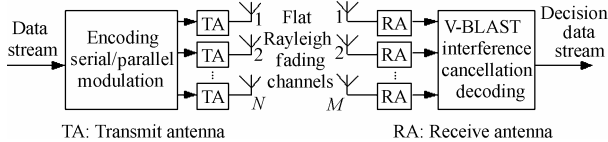


图 2 MIMO 信道模型

Fig.2 MIMO fading channels model

2.3 系统接收端结构

Turbo V-BLAST 的译码由 V-BLAST 迭代 ZF-HIC 译码和 Turbo 迭代译码通过软信息级联进行, 得到的 LLR 硬判决信息反馈到 V-BLAST 译码更新软信息, 进行下次迭代 ZF-HIC 检测, 从而形成双迭代和系统级联迭代的多次迭代特征, 如图 3 所示。

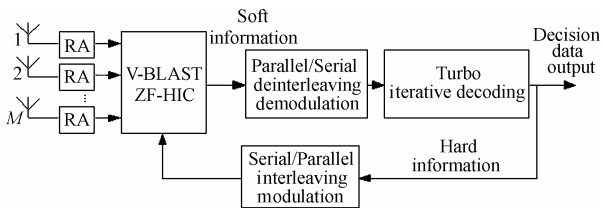


图 3 系统接收端结构

Fig.3 System receiver structure

3 双迭代级联译码算法

3.1 迭代 ZF-HIC

由式(1)的接收信号模型, 文献[4]采用一种线性的 ZF 干扰消除方法, 它通过选择迫零向量 \mathbf{w}_i ($i=1, 2, \dots, N$), 满足

$$\mathbf{w}_i^T (\mathbf{H})_j = \delta_{ij} \quad (2)$$

这里 $(\mathbf{H})_j$ 表示 \mathbf{H} 的第 j 列矢量, δ 是 Kronecher delta 函数。通过运算得到迫零矩阵 $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_N]$ 为

$$\mathbf{W} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H = \mathbf{H}^+ \quad (3)$$

其中 $(\cdot)^H$ 表示共轭转置, $(\cdot)^+$ 表示矩阵伪逆运算, $(\cdot)^{-1}$ 表示矩阵逆运算。

传统的排序 ZF-SIC 算法就是根据信道的衰落增益排序选择最可靠的 \mathbf{w}_i , 然后对第 i 根发射天线发射信号的迫零判决估计为 $\hat{\mathbf{y}}_i = \mathbf{w}_i^T \mathbf{r}$, 依次类推, 直到了所有发射信号被判决估计; 而 ZF-PIC 算法就是通过迫零矩阵 \mathbf{W} 同时求得所有发射信号的判决估计, 如 $\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{W}\mathbf{r}$ 。可知, 排序 ZF-SIC 算法需要采用 M 次伪逆, M 次排序, 而 ZF-PIC 算法只采用一次伪逆, 无需排序, 但性能相比 ZF-SIC 下降明显。

这里, 我们采用排序 ZF-HIC 算法^[8], 把接收天线按 G_{num} 分组, 组间采用 ZF-SIC 算法, 组内采用 ZF-PIC 算法, 这样只需要 M/G_{num} 次求伪逆, M/G_{num} 次排序, 因而复杂度得以降低。在性能上, 由于采用了排序的 ZF-SIC, 高 SNR 时能够得到分集优势; 采用了 ZF-PIC, 低 SNR 时能有效克服误码判决传递。因此, 排序 ZF-HIC 算法结合了排序 ZF-SIC 算法和 ZF-PIC 算法的优点。迭代排序 ZF-HIC 的算法流程如图 4 所示。

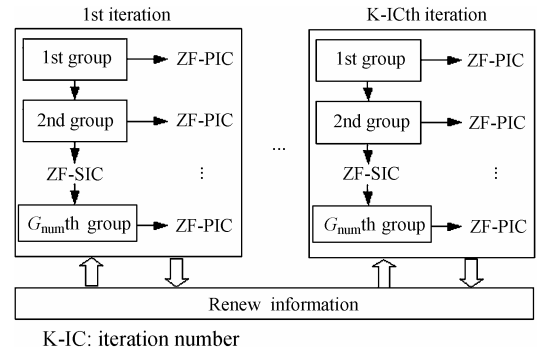


图 4 迭代 ZF-HIC 算法流程图

Fig.4 Iterative ZF-HIC algorithm

3.2 双迭代级联译码结构

Turbo 译码得到的 LLR 值能经过硬判决后反馈到 V-BLAST 的迭代 ZF-HIC, 从而形成双迭代级联译码结构, 如图 5 所示。

整个译码过程由 3 个迭代环组成。开始译码时, SW1 开关的 a→b, SW3 开关的 a→b 上, 译码处于干扰消除译码迭代环, 迭代 K-IC 次; 然后 SW1 开关的 a→c, 译码的并行软信息经过解调、并/串和解交织得到串行数据软信息流; 然后 SW2 开关的 a→b, 译码处于 Turbo 迭代译码环, 迭代 K-TC 次; 然后 SW2 开关 a→c, Turbo 译码的 LLR 经过硬判决后

通过串/并、交织和调制成为并行的调制信号；然后 SW3 开关 a→c，译码处于系统级联迭代环，提供干扰消除的先验信息，提高干扰消除译码的性能，进入下次双迭代级联译码过程，直到迭代 K-SYS 次。整个处理流程图如图 6 所示。

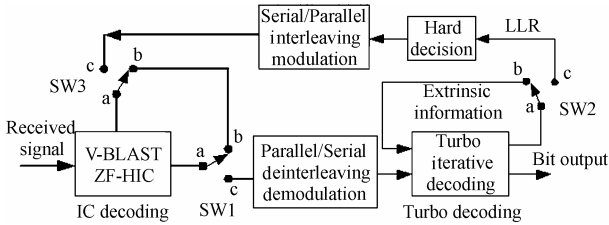


图 5 双迭代级联译码结构

Fig.5 Double-iterated concatenated decoding structure

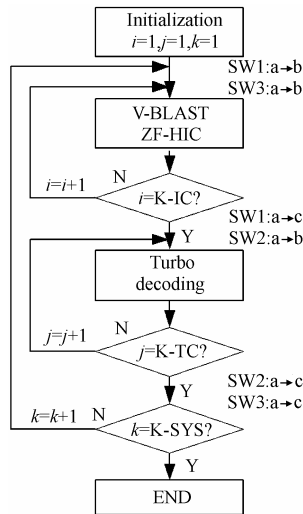


图 6 双迭代级联译码处理流程图

Fig.6 Flow chart of double-iterated concatenated decoding

4 仿真结果

按图 1 和图 3 进行系统发送和接收。MIMO 信道为独立 Rayleigh 衰落，系数满足 0 均值，方差为 1 的复高斯随机变量，发送端未知，接收端已知。加性噪声为高斯白噪声。接收端采用理想的相干检测，时钟和载波理想同步。

仿真条件如表 1 所示。采用不删余的码率(rate)为 1/3 的 Turbo 编码器，格状为 4 状态，分量编码器间采用随机交织器，第 1 分量编码器格状终端归零，第 2 分量编码器格状终端状态随机。V-BLAST 天线阵列采用 N=6 发射和 M=6 接收，调制方式采用 BPSK，这样频谱利用率为 $rateN \log_2 M_d$ (M_d 是调制指数)，如 BPSK 为 2bit/(s·Hz)。

图 7 给出了(6,6)的 MIMO 系统下 4 种情况的 BER 性能仿真曲线，分别为没有 Turbo 信道编码的 V-BLAST 系统，包括 ZF-SIC 和 ZF-HIC ($G_{num}=2$ 、K-IC=3)以及有 Turbo 信道编码(K-TC=5)的 V-BLAST 系统，包括 ZF-SIC 和 ZF-HIC (K-SYS=0~3)，这里 K-SYS=0 表示没有系统级联。从 BER 性能曲线可以看出，结合 Turbo 信道编码的 V-BLAST 系统在高 SNR 时性能明显提高。系统级联迭代译码为 3 次时性

能已经稳定，无须再迭代。可以看出，ZF-HIC 相比 ZF-SIC 也有较大的性能提升，在系统级联 3 次，误码率在 1e-5 时，ZF-HIC 比 ZF-SIC 获得 2dB 增益。因此 ZF-HIC 是一种有效的干扰消除方法。从曲线上也可以看出 Turbo V-BLAST 性能和单天线 Turbo 码一样存在“地板效应”，这主要还是由 Turbo 编码器的并行级联结构决定的。

图 8 给出了(6,6)的 MIMO 系统下两种情况的 FER 性能仿真曲线，考虑有 Turbo 信道编码 (K-TC=5) 的 V-BLAST 系统，包括 ZF-SIC 和 ZF-HIC (K-SYS=0~3)。从 FER 性能曲线可以看出，与 BER 性能曲线相似，说明 ZF-HIC 不仅能有效提高 BER 性能，也能提高 FER 性能。

表 1 系统结构参数

Tab.1 System parameters

参数设置	取值
Turbo 编码器	$G=[7\ 5]_8$ $R=1/3$
交织方式	随机交织
译码算法	迭代 log-MAP
(交织长度、仿真帧数)	(1200, 1000)
调制方式	BPSK
(发射天线, 接收天线)	(6, 6)
干扰消除方式	ZF-HIC ($G_{num}=2$)、 ZF-SIC
K-IC	ZF-HIC 多级迭代 3 次
K-TC	Turbo 迭代译码 5 次
K-SYS	系统级联迭代 3 次

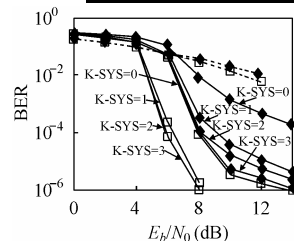


图 7 BER 性能仿真曲线

Fig.7 BER curves

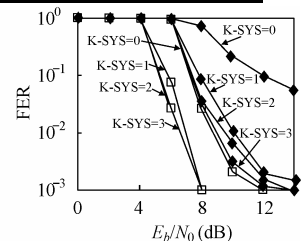


图 8 FER 性能仿真曲线

Fig.8 FER curves

5 结束语

本文提出了 Turbo V-BLAST 的双迭代级联译码结构，Turbo 编码造成的码率降低可以很好的用 BLAST 来弥补。V-BLAST 的干扰消除采用迭代的 ZF-HIC 算法，仿真证实，迭代 ZF-HIC 算法能有效提高系统性能，且相比 ZF-SIC 降低了计算的复杂度。由于系统存在系统级联迭代，很大程度上进一步改进了系统的 BER 和 FER。说明具有双迭代级联译码结构的 Turbo V-BLAST 系统是一种可行的结构。

参考文献

- [1] Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *European Transactions on Telecommunications*, 1999, 10(6): 585-595.
- [2] Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas. *Bell Labs Technical Journal*, 1996, Autumn: 41-59.
- [3] Wolniansky P W, Foschini G J. V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel. URSI International Symposium on Signals Systems and Electronics(ISSSE), PISA ITALY, 29 Sept.-2 Oct.,1998: 295-300.
- [4] Golden G D, Foschini G J. Dectecton algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture. *Electron. Lett*, 1999, 35(1): 14-16.
- [5] Biglieri E, Taricco G, Tulino A. Decoding space-time codes with BLAST architectures. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2002, 50(10): 2547-2552.
- [6] Li Yuan, Luo Zhi-quan. Parallel detection for V-BLAST system. *IEEE Int. Conf. on Communications(ICC)*, 28 April-2 May, 2002, 1: 340-344.
- [7] Berrou C, Glavieux A, Thitimajshima P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo- codes. *IEEE Int. Conf. on Communications(ICC)*, Geneva Switzerland, May, 93: 1064-1070.
- [8] Malik R, Dubey V K, McGuffin B. A hybrid Interference canceller for CDMA systems in Rayleigh fading channels. *Vehicular Technology Conference (VTC)*, 6-9 May, 2001, 2: 1523 - 1527.
- 胡 旻: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为信道编码理论研究(单天线纠错码和 MIMO 空时编码)以及 MIMO 多用户检测理论.
- 尹长川: 男, 1968 年生, 副教授, 研究方向为无线宽带通信.
- 乐光新: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线宽带通信.