

基于迫零检测的异步 V-BLAST 最优发射功率分配

官 鹭 唐友喜 邵士海 邓 凯

(电子科技大学通信抗干扰技术国防科技重点实验室 成都 610054)

摘 要: 由于异步发射 V-BLAST 各路子流的符号在时间上未对齐, 同步 V-BLAST 所采用的逐符号功率分配方法不再适用。针对这个问题, 该文提出了一种以块平均误比特率为优化目标, 逐符号块进行功率分配的方法。该方法首先计算每个符号的瞬时信噪比, 然后求出异步符号块的平均误比特率, 最后求解优化问题得到各天线的最优发射功率值。平坦瑞利衰落信道下的仿真表明: 两发两收、BPSK 调制、迫零检测的异步 V-BLAST, 误比特率为 10^{-3} 时最优功率分配有 2 dB 的性能改善。

关键词: 无线通信; V-BLAST; 异步; 迫零检测; 发射功率分配; 块平均误比特率

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)04-0786-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00509

Optimal Transmit Power Allocation for Asynchronous V-BLAST System Using Zero-Forcing Detecting

Guan Lu Tang You-xi Shao Shi-hai Deng Kai

(National Key Lab. of Communication, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Since different delay offsets are applied to the spatially multiplexed data streams of asynchronous vertical Bell Labs layered space-time (V-BLAST), the symbol-by-symbol power allocation method used in synchronous systems is invalid. According to this issue, a block-by-block power allocation algorithm is proposed to minimize the Block Average Bit Error Rate (BABER). This algorithm firstly computes the instantaneous SNR per symbol. Then BABER of asynchronous block is worked out. Finally, the optimum transmit power of each antennas is obtained from the solution of an optimization problem. Simulation results in flat Rayleigh fading channel show that the proposed algorithm has 2 dB gain at BER of 10^{-3} compared to the 2Tx2Rx asynchronous V-BLAST using BPSK modulation and zero-forcing detection.

Key words: Wireless communication; V-BLAST; Asynchronous; ZF detection; Transmit power allocation; Block average bit error rate

1 引言

与单天线无线通信方式相比, 贝尔实验室提出的垂直分层空时结构^[1](V-BLAST)可以在不增加频带宽度的前提下提高数据传输率。V-BLAST 最大似然(ML)检测可以获得最大接收分集度 M_r (M_r 为接收天线数), 但检测复杂度高^[2]。迫零(ZF)算法可以实现低复杂度检测, 但接收分集度只有 $M_r - M_t + 1$ (M_t 为发射天线数)^[3]。为了用一种低复杂度检测算法获得最大分集度, 文献[4]设计了一种将传统 V-BLAST 各子流延迟不同时间后发射的异步 V-BLAST 方案(延时为符号时间 T_s 的分数倍), 在接收端采用迫零检测即可获得最大分集度 M_r 。

利用接收机反馈信息对发射天线进行功率分配, 可以提高无线通信链路的性能^[5]。文献[5-7]以

最大化信道容量为目标, 研究了自适应发射速率的同步 V-BLAST 功率分配方法。针对固定速率的 V-BLAST, Nam 等人给出了串行干扰抵消(SIC)检测的最优功率分配算法^[8]; 文献[9]利用功率分配方法提高 MMSE 软迭代检测性能; 文献[10]设计了一种 MMSE 检测的发射功率分配算法。在这些方法中, 发射机通过反馈信道获得信道的参数后, 对不同子流逐个符号进行功率分配, 但异步 V-BLAST 各路子流上的符号不再对齐^[4], 传统基于同步 V-BLAST 的逐符号进行功率分配的方法不再适用。

本文研究迫零检测异步 V-BLAST 的发射功率分配问题, 提出一种基于块平均误比特率最小准则的异步 V-BLAST 功率最优分配方法。选取与异步 V-BLAST^[4]相同的信道条件进行仿真, 验证了算法有效性。该方法在整个符号块时间内只需要接收机反馈一次信道特征参数, 具有反馈量小的优点。

本文其他部分安排为: 第 2 节给出了最优功率

2009-04-10 收到, 2009-11-23 改回

国家自然科学基金(60902027, 60832007, 60901018)资助课题

通信作者: 唐友喜 tangyx@uestc.edu.cn

分配的异步发射 V-BLAST 系统模型; 第 3 节对块平均误比特率的表达式进行了推导, 建立了功率约束下的优化问题并进行求解; 仿真结果和分析在第 4 节给出; 最后是对全文的总结。

2 系统模型

考虑具有 M_t 根发射天线, M_r 根接收天线的异步 V-BLAST 系统, 模型如图 1 所示。

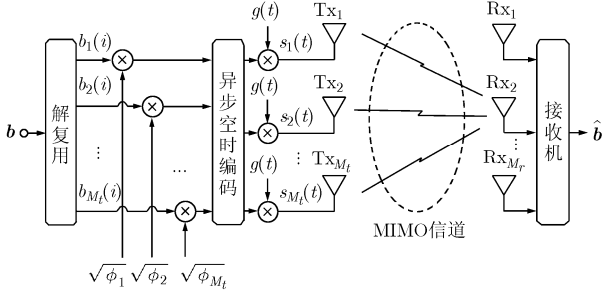


图 1 系统模型

2.1 发射机模型

在发射端, 解复用后的符号先分别乘上该支路的最优功率分配因子 $\sqrt{\phi_k}$ ($k = 1, 2, \dots, M_t$); 功率分配后对符号进行异步处理^[4], 将第 k 路子流延时 τ_k , 如图 2 所示; 异步子流分别通过成形滤波器后第 k 根发射天线上的等效复基带信号可以表示为

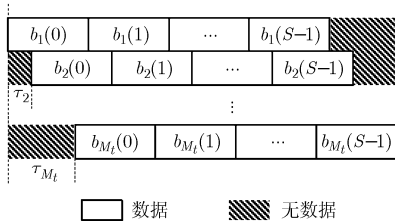


图 2 异步空时编码

$$s_k(t) = \sqrt{\frac{\phi_k E_s}{M_t}} \sum_{i=0}^{S-1} b_k(i) g(t - iT_s - \tau_k) \quad (1)$$

其中 E_s 为总发射功率; $b_k(i), i = 0, 1, \dots, M_t$ 为第 k 根发射天线上的第 i 个调制符号; S 为一个异步空时块中的符号数; T_s 为一个符号的持续时间; 不失一般性, 假设 $\tau_1 = 0$; $g(t)$ 为发送基带波形。

2.2 接收机模型

为了与异步 V-BLAST 进行公平比较, 信道参数与文献[4]一致, 考虑平坦瑞利衰落信道, 则信道增益 $h_{jk}(i)$ 为零均值单位方差的复高斯随机变量, 各收发天线对之间信道统计独立。

在接收端, 接收机噪声为零均值、方差为 N_0 的加性复高斯白噪声。对接收信号进行匹配滤波后,

第 j 根接收天线的输出可以表示为^[4]

$$Y_j = \sqrt{\frac{E_s}{M_t}} \mathcal{R} H_j \Phi b + n_j \quad (2)$$

其中 \mathcal{R} 为 $SM_t \times SM_t$ 实相关矩阵^[4]; H_j 为第 j 根天线对应的空时信道矩阵^[4]; 功率分配矩阵 $\Phi = I_S \otimes \phi$, 其中 $\phi = \text{diag}(\sqrt{\phi_1}, \sqrt{\phi_2}, \dots, \sqrt{\phi_{M_t}})$; b 为一个异步空时块内数据符号的向量形式; n_j 为第 j 根天线的噪声向量经过匹配滤波后的输出^[4], 满足 $n_j n_j^H = N_0 \mathcal{R}$ 。

对 Y_j 进行合并得

$$Y = \sum_{j=1}^{M_r} \Phi^{-1} H_j^H \mathcal{R}^{-1} Y_j = \sum_{j=1}^{M_r} \sqrt{\frac{E_s}{M_t}} \Phi^{-1} H_j^H H_j \Phi b + \Phi^{-1} H_j^H \mathcal{R}^{-1} n_j \quad (3)$$

由于 H_j 为对角阵^[4], 式(3)可以进一步简化为

$$Y = \sum_{j=1}^{M_r} \sqrt{\frac{E_s}{M_t}} H_j^H H_j b + \Phi^{-1} H_j^H \mathcal{R}^{-1} n_j \quad (4)$$

采用迫零检测可得

$$\hat{b} = \left(\sum_{j=1}^{M_r} H_j^H H_j \right)^{-1} Y = \sqrt{\frac{E_s}{M_t}} b + \tilde{n} \quad (5)$$

其中检测后的噪声 $\tilde{n} = \left(\sum_{j=1}^{M_r} H_j^H H_j \right)^{-1} \cdot \sum_{j=1}^{M_r} \Phi^{-1} H_j^H \mathcal{R}^{-1} n_j$ 。

由 \tilde{n} 的表达式可以得出噪声方差矩阵为

$$E(\tilde{n} \tilde{n}^H) = N_0 \left(\sum_{j=1}^{M_r} H_j^H H_j \right)^{-1} \cdot \sum_{j=1}^{M_r} \Phi^{-1} H_j^H \mathcal{R}^{-1} H_j \Phi^{-1} \left(\sum_{j=1}^{M_r} H_j^H H_j \right)^{-H} \quad (6)$$

则第 k 路子流, 第 i 时刻的噪声方差为

$$E(\tilde{n} \tilde{n}^H)_{k+iM_t, k+iM_t} = N_0 \frac{(\mathcal{R}^{-1})_{k+iM_t, k+iM_t}}{\sum_{j=1}^{M_r} \phi_k |h_{jk}(i)|^2} \quad (7)$$

其中 $(A)_{p,q}$ 表示矩阵 A 的第 p 行, 第 q 列的元素。由式(7)可以得出, 第 k 路子流, 第 i 时刻的接收信噪比为

$$\gamma_k(i) = \frac{E_s/M_t}{E(\tilde{n} \tilde{n}^H)_{k+iM_t, k+iM_t}} = \frac{E_s \sum_{j=1}^{M_r} |h_{jk}(i)|^2}{N_0 M_t (\mathcal{R}^{-1})_{k+iM_t, k+iM_t}} = \phi_k \xi_k(i) \quad (8)$$

$$\text{其中 } \xi_k(i) = \frac{E_S \sum_{j=1}^{M_r} |h_{jk}(i)|^2}{N_0 M_t (\mathcal{R}^{-1})_{k+iM_t, k+iM_t}}.$$

在得到了第 k 路子流, 第 i 时刻符号的信噪比表达式后, 可以以 Q 函数的形式表示出第 k 路子流, 第 i 时刻的误比特率^[11]. 对于 BPSK 调制, 误比特率可以表示为

$$P_k(i) = Q\left(\sqrt{2\phi_k \xi_k(i)}\right) \quad (9)$$

3 最优功率分配

利用发射端功率分配可以提高无线通信链路的可靠性, 已有针对同步 V-BLAST 的功率分配算法, 不再适用于异步 V-BLAST. 这是因为在异步 V-BLAST 中, 各子流上的符号时间上不再对齐, 如果采用逐符号的方法对图 2 所示的异步空时块进行功率分配^[5-9]: 从第 0 个符号时间开始对 $b_1(0), b_2(0), \dots, b_{M_t}(0)$ 进行功率分配, 分配后可以发现在第 1 符号时间内必须按照 0 时刻的功率分配值进行分配, 否则就不能使总功率保持恒定. 这样第 1 个符号时间就不能按照该时刻的最佳功率进行分配, 同样, 第 1 个符号时间的功率分配又将影响第 2 个符号时间, \dots . 以此类推可以发现第 0 个符号时间的功率分配将影响整个符号块, 从而在异步 V-BLAST 中逐符号功率分配方法失效.

为了解决这个问题, 本文提出一种逐符号块进行功率分配的方法. 采用最小化块平均误比特率准则对异步 V-BLAST 各子流进行发射功率分配, 其中块平均误比特率定义为

$$\bar{P} = \frac{1}{SM_t} \sum_{k=1}^{M_t} \sum_{i=0}^{S-1} P_k(i) \quad (10)$$

基于总发射功率恒定的假设, 各路子流的功率分配将受到约束, 优化问题可以描述为

$$\left. \begin{aligned} \min_{\{\phi_k\}} & \frac{1}{SM_t} \sum_{k=1}^{M_t} \sum_{i=0}^{S-1} P_k(i) \\ \text{s.t.} & \sum_{k=1}^{M_t} \phi_k = M_t, \quad \phi_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, M_t \end{aligned} \right\} (11)$$

直接对式(11)求解比较复杂, 通过对误码率表达式进行近似可以简化求解过程, 具体可表示为^[12]

$$P_k(i) = \frac{1}{5} \exp\{-c\phi_k \xi_k(i)\} \quad (12)$$

其中 c 是与具体调制方法相关的常数, 定义为^[12]

$$c = 3/(M^2 - 1), \quad M\text{-PAM} \quad (13)$$

$$c = \sin^2(\pi/M), \quad M\text{-PSK} \quad (14)$$

$$c = 1.5/(M - 1), \quad \text{正方形 } M\text{-QAM} \quad (15)$$

$$c = 6/(5M - 4), \quad \text{矩形 } M\text{-QAM} \quad (16)$$

利用式(12), 可以得出块平均误比特率的近似值

$$\bar{P} = \frac{1}{5SM_t} \sum_{k=1}^{M_t} \sum_{i=0}^{S-1} \exp\{-c\phi_k \xi_k(i)\} \quad (17)$$

将式(11)中的 $\bar{P}(\phi_k)$ 用 $\tilde{P}(\phi_k)$ 替换后进行求解优化问题. 令

$$L = \frac{1}{5SM_t} \sum_{k=1}^{M_t} \sum_{i=0}^{S-1} \exp\{-c\phi_k \xi_k(i)\} + \mu \left(\sum_{k=1}^{M_t} \phi_k - M_t \right) \quad (18)$$

其中 μ 为拉格朗日乘数, 分别对 ϕ_k 求偏导数:

$$\frac{\partial L}{\partial \phi_k} = -\frac{1}{5SM_t} \sum_{i=0}^{S-1} c \xi_k(i) \exp\{-c\phi_k \xi_k(i)\} + \mu \quad (19)$$

再令这 M_t 个偏导数分别等于 0, 构成 M_t 个方程, 并与式(11)的功率约束方程联立构成一个 $M_t + 1$ 元方程组. 利用牛顿法^[13]求解非线性方程组, 即可得出最优功率分配值.

4 性能分析与仿真比较

本节通过计算机仿真考察功率分配对异步 V-BLAST 系统性能的影响, 以验证提出算法的有效性.

仿真条件和主要参数如下: 调制方式为 BPSK、平坦瑞利衰落信道、迫零检测、 $f_d T_s = 1 \times 10^{-3}$, 其中 f_d 为最大多普勒频移, T_s 为符号时间; 不失一般性设第 1 根发射天线时延 $\tau_1 = 0$; 假设接收端已知信道信息, 计算出功率分配矩阵后将分配因子 $\sqrt{\phi_k}$ ($k = 1, 2, \dots, M_t$) 反馈到发射端.

采用本文方法对具有 $M_t S$ 个符号的异步空时块进行功率分配, 接收机需要反馈 M_t 个实标量; 采用逐符号的方法需要反馈 $M_t S$ 个实标量. 逐符号块的功率分配方法所需反馈量为逐符号方法的 $1/S$.

在两发两收条件下, 针对某一具体的异步时延 ($\tau_2 = 0.6T_s$), 将本文提出的方法与未采用功率分配的异步 V-BLAST 迫零检测^[4]进行了性能比较, 并同时与同步 V-BLAST 的迫零检测、采用功率分配后的同步 V-BLAST 迫零检测^[10]进行比较, 仿真结果如图 3 所示.

从图 3 可以看出在误比特率为 10^{-3} 时, 本文提出方法比异步 V-BLAST 迫零检测性能提高了 2 dB, 与同步 V-BLAST 迫零检测相比, 性能改善大于 7 dB; 相同条件下, 功率分配^[10]对同步 V-BLAST 的改善不明显. 从图中还可以发现在低信噪比时, 功率分配没有改善异步 V-BLAST 系统性能. 这是由于: (1) 在低信噪比时, 误码率函数的近似误差比较大, (2) 基于符号块的功率分配对每个符号来说不是最优的.

对于具有更多收发天线的结构, 也具有类似的

结论。在 4 发 4 收条件下, 针对某一组具体时延 ($\tau_2 = 0.3T_s$, $\tau_3 = 0.6T_s$, $\tau_4 = 0.9T_s$) 进行仿真分析, 比较对象与两发两收系统一致, 仿真结果如图 4 所示。仿真结果表明, 在误比特率为 10^{-3} 时, 本文提出方法比异步 V-BLAST 迫零检测性能提高了 1 dB, 与文献[10]提出的功率分配的方法相比, 性能改善大于 6.5 dB。

在不同的异步时延下, 将本文提出方法和异步 V-BLAST^[4]进行性能比较, 仿真结果如图 5 所示。从图中可以看出, 采用功率分配后, 异步 V-BLAST 误比特率性能仍然与时延有关, 最佳时延约为

$0.5T_s$ 。

5 结论

针对传统同步 V-BLAST 功率分配算法不适用于异步 V-BLAST 这一问题, 以最小化块平均误比特率为目标, 设计了一种逐符号块进行功率分配的方法。仿真结果表明, 两发两收采用 BPSK 调制的异步 V-BLAST, 在误比特率为 10^{-3} 时采用功率分配有 2 dB 的性能提升。与同步系统相比, 功率分配对异步系统的改善更加明显, 并且逐符号块的方法需要更少的反馈比特数, 有利于实际系统的实现。

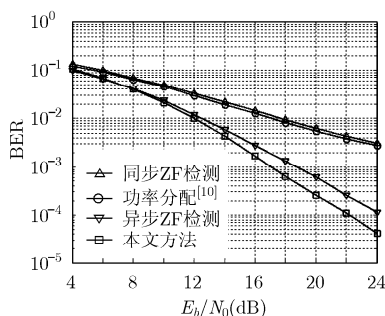


图 3 误比特率性能比较
(2 发 2 收, $\tau_1 = 0$, $\tau_2 = 0.6T_s$)

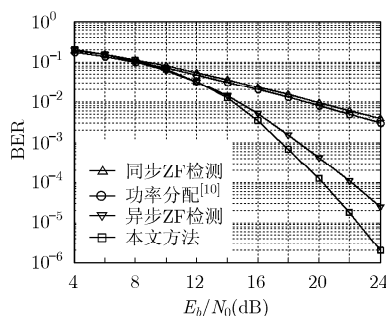


图 4 误比特率性能比较(4 发 4 收,
 $\tau_1 = 0$, $\tau_2 = 0.3T_s$, $\tau_3 = 0.6T_s$, $\tau_4 = 0.9T_s$)

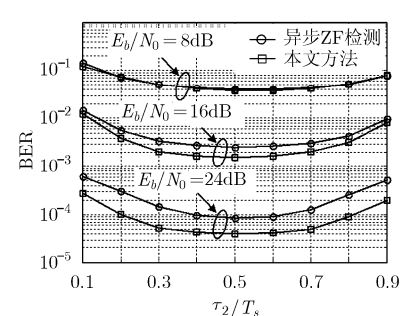


图 5 不同信噪比下时延
对误比特率的影响($\tau_1 = 0$)

参考文献

- [1] Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas [J]. *Bell Labs Technical Journal*, 1996, 1(2): 41-59.
- [2] 倪兴, 王晓湘, 杜娟. 一种新的基于噪声预测的部分判决反馈 MIMO 接收算法[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(1): 52-54.
Ni Xing, Wang Xiao-xiang, and Du Juan. A noise-predictive partial decision-feedback detection for MIMO systems [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(1): 52-54.
- [3] Zhang R and Cioffi J M. Approaching MIMO-OFDM capacity with zero-forcing V-BLAST decoding and optimized power, rate, and antenna-mapping feedback [J]. *IEEE Transaction on Signal Processing*, 2008, 56(10): 5191-5203.
- [4] Shao S H, Tang Y X, and Kong T. Performance analysis of a modified V-BLAST system with delay offsets using zero-forcing detection [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007, 56(6): 3827-3837.
- [5] Demirkol M F and Ingram M A. Power-controlled capacity for interfering MIMO links [C]. *IEEE Vehicular Technology Conference*, Atlanta, GA, USA, Oct.7-11, 2001: 187-191.
- [6] Chung S T, Lozano A, and Howard H C. Approaching eigenmode BLAST channel capacity using V-BLAST with rate and power feedback [C]. *IEEE Vehicular Technology Conference*, Atlanta, GA, USA, Oct.7-11, 2001: 915-919.
- [7] Hwang K J and Lee K B. Transmit power allocation with small feedback overhead for a multiple antenna system [C]. *IEEE Vehicular Technology Conference*, Vancouver, BC, Canada, Sep. 24-28, 2002: 2158-2162.
- [8] Nam S H, Shin O S, and Lee K B. Transmit power allocation for a modified V-BLAST system [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2004, 52(7): 1074-1079.
- [9] 唐万斌, 张亮, 李少谦. V-BLAST 系统中采用发射功率分配的 MMSE 迭代软干扰抵消算法[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(9): 1640-1644.
Tang Wan-bin, Zhang Liang, and Li Shao-qiang. MMSE iterative soft interference cancellation algorithm using transmit power allocation scheme in V-BLAST system [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(9): 1640-1644.
- [10] Wang N and Blostein S D. Approximate minimum BER power allocation for MIMO spatial multiplexing systems [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(1): 180-187.
- [11] Proakis J G. *Digital Communications* [M]. New York: McGrawHill, 2001: 266-267.
- [12] Zhou S and Giannakis G B. Adaptive modulation for multi-antenna transmissions with channel mean feedback [C]. *IEEE International Conference on Communications*, Anchorage, AK, USA, May 11-15, 2003: 2281-2285.
- [13] 郑威义. *计算方法* [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2005: 100-103.
Zheng Jian-yi. *Computational Methods* [M]. Guangzhou: Publishing house of Huanan Science and Engineering University, 2005: 100-103.

官 鹭: 男, 1983 年生, 博士生, 研究无线通信中的信号处理。
唐友喜: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 从事无线通信中的信号检测研究。
邵士海: 男, 1980 年生, 讲师, 从事扩频通信及 MIMO 检测研究。