

MIMO 空间复用系统的最小 BER 比特分配

车小林^① 何晨^① 蒋铃鸽^① 熊勇^②

^①(上海交通大学电子工程系 上海 200240)

^②(上海无线通信研究中心 上海 200050)

摘要: 该文基于最小误比特率(BER)准则,提出了多输入多输出(MIMO)空间复用系统的贪婪比特分配算法和基于二分法的比特分配算法。在总比特速率和每个发射天线分配相等功率的约束条件下,通过比特分配优化每个发射天线的调制方式,改善了系统的 BER 性能。仿真结果表明,与传统的 MIMO 系统相比,比特分配的 MIMO 系统可获得显著的信噪比(SNR)增益;与功率分配相比,比特分配在性能损失很小的情况下减少了每个发射天线的功率放大器的动态范围。

关键词: MIMO; 空间复用; 比特分配; 功率分配

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-0784-04

Minimum BER Bit Allocations for MIMO Spatial Multiplexing Systems

Che Xiao-lin^① He Chen^① Jiang Ling-ge^① Xiong Yong^②

^①(Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

^②(Shanghai Research Center for Wireless Communications, Shanghai 200050, China)

Abstract: Based on the minimum Bit Error Rate (BER) criterion, a greedy bit allocation algorithm and bisection-method based bit allocation algorithm are proposed for Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) spatial multiplexing systems. Under the constraint of total bit rate and equal power allocation to each transmit antenna, the proposed transmit bit allocation algorithms can achieve better performance by optimizing the modulation order of each transmit antenna. The simulation results show that the proposed system can obtain significant Signal-to-Noise Ratio (SNR) gain relative to the conventional MIMO system. In addition, compared with the transmit power allocation scheme, the requirements on the dynamic range of the power amplifiers for each transmit antenna are reduced with little performance loss.

Key words: MIMO; Spatial multiplexing; Transmit Bit Allocation (TBA); Transmit Power Allocation (TPA)

1 引言

在多输入多输出(MIMO)空间复用系统中,发射机采用多个发射天线并行发射多个不同的数据流,接收机使用多个接收天线通过贝尔实验室提出的垂直分层空时结构(V-BLAST)^[1]检测所发射的数据,从而获得复用增益。当无线信道为准静态时,发射机可以利用接收机反馈的信道状态信息(CSI),采用自适应调制技术改善 V-BLAST 的性能^[2]。文献[3]提出了一种发射功率分配(TPA)方案,在每个发射天线的调制方式和总发射功率不变的条件下,通过给每个天线分配合适的发射功率降低了系统的误比特率(BER)。然而,由于每个发射天线上所分配的功率由信道的状态所确定,要求发射机的功率放大器有比较大的动态范围,增加了系统的成本。

根据文献[2, 3]的思想,本文提出了基于最小 BER 准则

的比特分配(TBA)方案。在总比特速率不变的条件下,每个发射天线上分配相同的功率,通过优化调制方式改善系统的 BER 性能。由于每个发射天线的功率恒定,降低了对功率放大器的动态范围的要求。此外,接收机利用各数据流检测后的信噪比(SNR)或信干噪比(SINR)信息,计算发射天线的调制方式;然后将其反馈到发射机,减少了反馈的数据量。以平均 BER 最小化为准则,根据文献[4, 5]的思想,本文设计了贪婪比特分配算法。为了降低计算复杂度,使每个数据流的 BER 近似相等,提出了一个基于二分法的比特分配算法。仿真结果表明,与传统的 MIMO 系统相比,比特分配的 MIMO 系统可获得显著的信噪比增益。此外,使用迫零(ZF)接收机时,比特分配方案的性能优于功率分配方案^[3];使用最小均方误差(MMSE)接收机时,两种方案在 SNR 高于 20dB 时都优于采用极大似然(ML)检测的传统 MIMO 系统。

2 信号和系统模型

考虑一个采用 M 个发射天线和 N ($N \geq M$) 个接收天

2006-10-15 收到, 2007-12-06 改回

国家自然科学基金(60772100, 60372076)和上海市重大科技攻关项目(06DZ15013)资助课题

线MIMO无线通信系统。发射机将要传输的信息比特分解为 M 个数据流。利用接收机所反馈的信息,不同的数据流分别使用不同的调制方式,调制为符号后通过发射天线发射出去。设 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_M]^T$ 表示每符号周期发射的符号向量,相应的调制阶数为 $[R_1, R_2, \dots, R_M]^T$ 。则每个符号周期发射的总比特数是 $R_T = \sum_{i=1}^M R_i$ 。

接收信号可以建模为

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

其中 \mathbf{H} 为 $N \times M$ 的信道矩阵,它的元素为相互独立、同分布、零均值、方差为1的复高斯随机变量; \mathbf{n} 是 $N \times 1$ 的加性高斯白噪声向量,其每个元素的方差为 σ^2 ,即 $E\{\mathbf{n}\mathbf{n}^H\} = \sigma^2 \mathbf{I}_M$, \mathbf{I}_M 是维数为 M 的单位矩阵;设每个数据流的发射功率都相等,为了简单起见将每个数据流的发射功率归一化为1,即 $E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^H\} = \mathbf{I}_M$ 。所以,每个接收天线上接收信号的SNR为 $\gamma_s = M/\sigma^2$ 。

在V-BLAST接收机中,基于ZF或MMSE准则,采用连续干扰抵消(SIC)或排序的连续干扰抵消(OSIC)检测,估计发射符号。V-BLAST检测算法的具体描述详见文献[1, 3]。假设检测顺序为 $\{k_1, k_2, \dots, k_M\}$, \mathbf{H}_j 为第 j 个检测阶段时的等效信道矩阵,维数为 $N \times (M - j + 1)$,它是在 \mathbf{H} 中依次去掉第 k_1, k_2, \dots, k_{j-1} 列后所形成的矩阵。所以

$$\mathbf{H}_j = [h_{k_j}, h_{k_{j+1}}, \dots, h_{k_M}] \quad (2)$$

其中 h_{k_j} 是矩阵 \mathbf{H} 的第 k_j 列。

第 j 个检测阶段的ZF线性接收机为

$$\mathbf{G}_{\text{ZF},j} = (\mathbf{H}_j^H \mathbf{H}_j)^{-1} \mathbf{H}_j^H \quad (3)$$

则该阶段用于检测符号 x_{k_j} 的向量可以表示为

$$\mathbf{w}_{\text{ZF},k_j} = (\mathbf{G}_{\text{ZF},j})_{k_j} \quad (4)$$

其中 $(\mathbf{G}_{\text{ZF},j})_{k_j}$ 是矩阵 $\mathbf{G}_{\text{ZF},j}$ 中用于检测符号 x_{k_j} 的行向量。所以,经过ZF接收机之后检测符号 x_{k_j} 的SNR是

$$\gamma_{\text{ZF},k_j} = \frac{1}{\|\mathbf{w}_{\text{ZF},k_j}\|^2 \sigma^2} \quad (5)$$

第 j 个检测阶段的MMSE线性接收机为

$$\mathbf{G}_{\text{MMSE},j} = (\mathbf{H}_j^H \mathbf{H}_j + \sigma^2 \mathbf{I}_{M-j+1})^{-1} \mathbf{H}_j^H \quad (6)$$

则用于检测 x_{k_j} 的行向量为

$$\mathbf{w}_{\text{MMSE},k_j} = (\mathbf{G}_{\text{MMSE},j})_{k_j} \quad (7)$$

其中 $(\mathbf{G}_{\text{MMSE},j})_{k_j}$ 是矩阵 $\mathbf{G}_{\text{ZF},j}$ 中检测符号 x_{k_j} 的行向量。经过MMSE线性接收机之后检测符号 x_{k_j} 的SINR是

$$\gamma_{\text{MMSE},k_j} = \frac{|\mathbf{w}_{\text{MMSE},k_j}^H \mathbf{h}_{k_j}|^2}{\|\mathbf{w}_{\text{MMSE},k_j}\|^2 \sigma^2 + \sum_{i=j+1}^M |\mathbf{w}_{\text{MMSE},k_j}^H \mathbf{h}_{k_i}|^2} \quad (8)$$

因此, V-BLAST 接收机的平均 BER 可以近似表示为

$$P(R_1, R_2, \dots, R_M) \approx \frac{1}{R_T} \sum_{i=1}^M R_i f_i(\gamma_i, R_i) \quad (9)$$

其中 γ_i 为第 i 个数据流检测后的 SNR 或者 SINR; 在 ZF 接收机中 γ_i 等于式(5)中的 $\gamma_{\text{ZF},i}$, 在 MMSE 接收机中它等于式(8)中的 $\gamma_{\text{MMSE},i}$; $f(\gamma_i, R_i)$ 表示第 i 个数据流的 BER。

比特分配问题可以描述为在满足总比特速率的条件下对代价函数 $F = P(R_1, R_2, \dots, R_M)$ 求最小值, 即

$$\min_{R_1, R_2, \dots, R_M} P(R_1, R_2, \dots, R_M) \text{ s.t. } \sum_{i=1}^M R_i = R_T \quad (10)$$

由于上述优化问题的代价函数中所含有的误比特率表达式 $f(\gamma_i, R_i)$ ($i = 1, 2, \dots, M$) 一般为不能解析表达的 Q 函数^[6]。因此, 很难闭式求解最优的离散比特调制阶数。如果使用穷举搜索, 计算复杂度很高, 实际系统中难以实时实现。为了解决这一问题, 下一节设计了可行的算法。

3 比特分配算法

为了求解优化问题式(10), 首先对现有的基于传输容量最大化的贪婪比特分配算法^[4]和基于查表方法的最小 BER 增量比特分配算法^[5]进行了修改, 提出了一种基于 BER 最小的贪婪比特分配算法。其次, 为了进一步降低计算复杂度, 通过对式(10)进行简化, 提出了基于二分法的比特分配算法。下面详细介绍这两个比特分配算法。

3.1 贪婪比特分配算法

首先, 将总发射功率平均分配给各发射天线, 然后进行多步迭代比特分配; 当某个子信道所分配的比特数增加一个时, 系统的 BER 会增加; 每步分配一个比特到使 BER 增量最小的数据流上, 直到已分配的总比特数等于系统要求的总比特速率为止。具体步骤如下:

(1)初始化: 将各数据流所分配的比特数和已经分配的总比特数置为零。即, $R_i = 0, i = 1, 2, \dots, M, R_{\text{total}} = 0$;

(2)在接收机中根据信道状态信息确定 γ_i ; 采用 ZF 接收机时按式(5)计算, 采用 MMSE 接收机时按式(8)计算;

(3) $j = 1, 2, \dots, M$ 时分别计算:

$$P_j(R_1, R_2, \dots, R_{j-1}, R_j + 1, R_{j+1}, \dots, R_M) = \frac{1}{R_{\text{total}} + 1} \sum_{i=1, i \neq j}^M R_i f_i(\gamma_i, R_i) + \frac{R_j + 1}{R_{\text{total}} + 1} f_j(\gamma_j, R_j + 1)。$$

在所有的 P_j ($j = 1, 2, \dots, M$) 中找出最小的值, 设 $\min_j P_j(R_1, R_2, \dots, R_{j-1}, R_j + 1, R_{j+1}, \dots, R_M) = k$;

(4)给第 k 个数据流增加一个比特, 则 $R_k = R_k + 1, R_{\text{total}} = R_{\text{total}} + 1$;

(5)如果 $R_{\text{total}} < R_T$, 则返回到第(3)步。如果 $R_{\text{total}} = R_T$, 则得到了比特分配的结果 $[R_1, R_2, \dots, R_M]^T$ 。将其反馈到发射机用于确定每个数据流的调制阶数。

3.2 基于二分法的比特分配算法

实际上, MIMO 空间复用系统的平均 BER 主要由 BER 最大的数据流所决定, 一个接近最优的方法是使不同数据流的 BER 都相等。这样式(10)可以表达为

$$f_1(\gamma_1, R_1) = f_2(\gamma_2, R_2) = \dots = f_M(\gamma_M, R_M) = \text{BER}$$

$$\text{s.t. } R_T = \sum_{i=1}^M R_i \quad (11)$$

其中 BER 是一未知数。为了求解该问题, 利用 BER 上界的近似表达式^[7]

$$f_i(\gamma_i, R_i) = 0.2 \exp\left(\frac{-1.6\gamma_i}{2^{R_i} - 1}\right), \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (12)$$

结合式(11)与式(12), 可得

$$R_i = \log_2\left(1 - \frac{1.6\gamma_i}{\ln(5\text{BER})}\right), \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (13)$$

设 $\lambda = -\frac{1.6}{\ln(5\text{BER})}$, 比特分配问题可以描述为

$$\left. \begin{aligned} R_i &= \log_2(1 + \lambda\gamma_i), \quad i = 1, 2, \dots, M \\ R_T &= \sum_{i=1}^M R_i \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

该非线性方程组的闭式解析求解仍旧很困难。从式(14)可知 R_i 为 λ 的单调增函数, 考虑使用二分法^[8]迭代求解, 详尽的算法如下:

(1) 初始化 $\lambda_{\text{low}} = (2^{R_T/M} - 1) / \gamma_{\text{max}}$ 和 $\lambda_{\text{high}} = (2^{R_T/M} - 1) / \gamma_{\text{min}}$, 其中 $\gamma_{\text{max}} = \max_i \gamma_i$, $\gamma_{\text{min}} = \min_i \gamma_i$;

(2) 计算 $R_{\text{low}} = \sum_{i=1}^M \lfloor \log_2(1 + \lambda_{\text{low}}\gamma_i) \rfloor$ 和 $R_{\text{high}} = \sum_{i=1}^M \lceil \log_2(1 + \lambda_{\text{high}}\gamma_i) \rceil$, 其中 $\lfloor x \rfloor$ 表示下取整, 所以 $R_{\text{low}} \leq R_T \leq R_{\text{high}}$;

(3) 计算 $\lambda = \frac{\lambda_{\text{low}} + \lambda_{\text{high}}}{2}$ 和 $R_{\text{total}} = \sum_{i=1}^M \lceil \log_2(1 + \lambda\gamma_i) \rceil$;

(4) 如果 $R_{\text{total}} < R_T$, 则 $R_{\text{low}} = R_{\text{total}}$, $\lambda_{\text{low}} = \lambda$; 否则, 如果 $R_{\text{total}} > R_T$, 那么 $R_{\text{high}} = R_{\text{total}}$, $\lambda_{\text{high}} = \lambda$;

(5) 如果 $R_{\text{high}} - R_{\text{low}} > 1$, 则返回到第(3)步; 否则, 如果 $R_{\text{low}} = R_T$, 那么 $R_i = \lfloor \log_2(1 + \lambda_{\text{low}}\gamma_i) \rfloor$ ($i = 1, 2, \dots, M$); 如果 $R_{\text{high}} = R_T$, 那么 $R_i = \lceil \log_2(1 + \lambda_{\text{high}}\gamma_i) \rceil$ ($i = 1, 2, \dots, M$)。

4 数值仿真与结果分析

考虑一个 4 输入、4 输出的 MIMO 通信系统, 信道模型为准静态瑞利衰落。通过仿真, 比较比特分配的 MIMO 系统、传统的 MIMO 系统^[3]和功率分配 MIMO 系统^[4]的 BER 性能。传统的 MIMO 系统使用 QPSK 调制, 每个符号周期发射 8 个比特。比特分配时, $R_T = 8$ 使得两种系统的频谱效率相等。

图 1 说明了采用 ZF 接收机时, 检测顺序和比特分配对 MIMO 系统的性能的影响。从图中可以看出, 相对于传统的 MIMO 系统, 发射机进行比特分配显著提高了系统性能。在 BER 为 10^{-2} 时, SIC 检测可以获得 8dB 的 SNR 增益; OSIC 检测可以获得 4dB 的 SNR 增益; 并且, 随着 SNR 的增加, 可以获得更高的增益。此外, 二分法比特分配算法可以接近贪婪比特分配算法的性能。采用 MMSE 接收机时, 检测顺

序和比特分配对 MIMO 系统的性能的影响的性能如图 2 所示, 同样本文所提出的方案明显优于传统的 MIMO 系统, 其它性能曲线和图 1 有着相同的趋势。

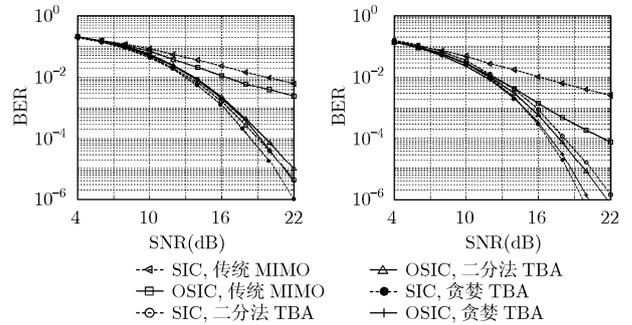


图 1 ZF 接收机时, 比特分配与传统 MIMO 系统性能比较

图 2 MMSE 接收机时, 比特分配与传统 MIMO 系统性能比较

图 3 比较了二分法比特分配和发射功率分配两种方案在 SIC 检测时的性能。采用 ZF 接收机时, 比特分配明显优于功率分配, 在 BER 为 10^{-2} 时大约有 4dB 的 SNR 增益; 采用 MMSE 接收机时, 与功率分配方法相比, 比特分配在 BER 为 10^{-2} 时可获得 1dB 的 SNR 增益。图 4 比较了排序检测时, 两种方案以及传统的 MIMO 系统采用极大似然检测的性能。采用 ZF 接收机时比特分配优于功率分配。采用 MMSE 接收机时, 比特分配的性能稍差于功率分配; SNR 高于 20dB 时, 比特分配和功率分配优于 ML 接收机, 这是因为前面两种方案与 ML 检测相比可以获得更大的分集增益。

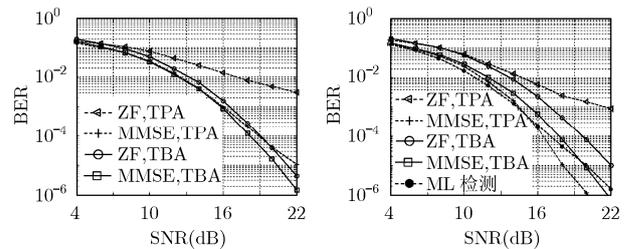


图 3 未排序检测时, 比特分配和发射功率分配的性能比较

图 4 排序检测时, 比特分配、发射功率分配与 MIMO 系统 ML 检测性能比较

5 结束语

本文提出了 MIMO 空间复用系统的比特分配方案, 设计了贪婪比特分配算法和基于二分法的比特分配算法。仿真表明, 所提出的方案明显优于传统的 MIMO 系统, 所要付出的代价是在接收机计算比特分配并反馈到发射机, 占用一定的系统资源。与功率分配方案相比较, 采用 ZF 接收机时, 性能有较大改善; 采用 MMSE 接收机时, SIC 检测时比特分配好于功率分配, OSIC 检测时比特分配稍差于功率分配。

参 考 文 献

- [1] Wolniansky W, Foschini G J, and Golder G D, *et al.* V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel [C]. URSI International Symposium on Signals, Systems, and Electronics, Pisa, Italy, 1998: 295-300.
- [2] Kim Y D, Kim I, and Choi J, *et al.* Adaptive modulation for MIMO systems with V-BLAST detection [C]. IEEE Vehicular Technology Conference, Jeju, Korea, April 2003: 1074-1078.
- [3] Nam S H, Shin O, and Lee K B. Transmit power allocation for a modified V-BLAST system [J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 2004, 52(7): 1074-1079.
- [4] Hughes-Hartogs D. Ensemble modem structure for imperfect transmission media [P]. Patent, USA, No. 4833706, 1989.
- [5] George Y and Amrani O. Bit loading algorithms for OFDM [C]. IEEE International Symposium on Information Theory, Chicago, USA, June 2004: 391.
- [6] John G. Proakis(著), 张力军, 张宗橙, 郑宝玉等(译). 数字通信(第四版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 169-241.
- [7] Chung S T and Goldsmith A J. Degree of freedom in adaptive modulation: A unified view. *IEEE Trans. on Commun.*, 2001, 49(9): 1561-1571.
- [8] 李庆杨, 王能超, 易大义. 数值分析(第三版)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004: 143-145.
- 车小林: 男, 1978年生, 博士生, 研究方向为MIMO无线通信系统的信号处理.
- 何 晨: 男, 1952年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新一代无线通信系统理论与关键技术、通信信号处理、数字信息隐藏与网络安全.
- 蒋铃鸽: 女, 1959年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为通信信号处理、移动通信、数字水印.
- 熊 勇: 男, 博士(后), 副研究员, 研究方向为多天线通信技术、移动计算机和随机模型.