

Turbo-BLAST 系统的分组高斯近似迭代检测算法

郭旭东, 李颖, 白宝明

(西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 给出了一种适用于 Turbo-BLAST 系统的低复杂度分组高斯近似迭代译码算法. 该算法将各天线的发送信号分成两组, 将其中一组信号的叠加看作干扰来检测另一组信号. 为简化计算, 利用随机交扰的特点和中心极限定理, 将干扰组的信号叠加近似为高斯分布随机变量, 然后根据最大后验概率原则计算另一组信号的对数似然比. 所提方法不仅可有效降低 MIMO 检测的计算复杂度, 同时其性能也可逼近最优检测算法的性能.

关键词: 贝尔实验室分层空时结构; 分组检测; 软输入软输出; 高斯近似

中图分类号: TN911.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2007)01-0135-05

Group Gaussian approximation iterative detection for Turbo-BLAST

GUO Xu-dong, LI Ying, BAI Bao-ming

(State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: A low complexity group Gaussian approximation iterative detection for Turbo-BLAST is proposed. The proposed algorithm divides the transmitted signals into two groups. After assuming the superposition of the transmitted signals in one group in a Gaussian variable, the log-likelihood ratio of each bit in another group is calculated via maximum a posterior principle. The proposed algorithm can considerably decrease the receiver complexity. Furthermore, the performance of the new algorithm can also approach the optimal detection when the system has more receiver antennas than transmitter antennas.

Key Words: Bell Lab Layered Space-Time (BLAST); group detection; soft-input soft-output (SISO); Gaussian approximation

Turbo-BLAST 系统采用贝尔实验室分层空时结构 (BLAST, Bell Lab Layered Space-Time) 作为内码来提供复用增益, 利用传统信道编码技术提供分集增益和编码增益以获得逼近多天线信道容量的性能, 是一种简单有效的级联方案. Turbo-BLAST 系统采用的信道编码技术以及软输入软输出 (SISO, Soft-Input Soft-Output) 迭代译码算法是影响性能和复杂度的两个关键因素.

文[6]详细介绍了 BLAST 的基本结构和编码原理. BLAST 的软输入软输出 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 检测算法的基本原理是利用所有可能的符号序列计算每个比特的对数似然比及外信息, 其复杂度随发送天线数和调制阶数的增加而指数增加. 目前, 已提出的各种次优的检测算法, 在尽可能不损失性能的前提下降低 MIMO 检测算法的复杂度, 包括 SISO 球包限译码算法^[1]、基于高斯近似的序列译码算法 (SGA, Sequential Algorithm with Gaussian Approximation)^[2] 和最大似然决策反馈 (ML-DFE, Maximum Likelihood Decision Feedback Estimation) 分组检测方法^[3] 等. 球包限译码和 SGA 的基本原理均是根据各符号序列对信息比特似然比贡献大小的不同, 来选择其中一部分计算每个信息比特的对数似然比和外信息. 球包限译码算法将接收的复信号划分成实部和虚部两部分, 然后通过改变球包半径的大小来确定

收稿日期: 2006-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60502046, 60472098), 西安电子科技大学研究生创新基金资助课题

作者简介: 郭旭东 (1971-), 男, 西安电子科技大学硕士研究生.

所选择的符号序列的个数,从而降低复杂度. SGA 对接收信号进行处理后,利用高斯近似来计算后验概率,并根据序列译码原理来确定最有可能的 M 种信号组合. 上述两种算法均需要从所有信号组合中搜索来确定最有可能的 P 种信号组合,计算复杂度依然较高. ML-DFE 检测将 DFE 检测方法进行推广,提出了分组检测的概念,但没有给出相应的软输入软输出检测方法. 最近,文[4]针对采用 BPSK 和 4PSK 调制的交织多址空时结构(IDM-ST, Interleaver Division Multiplex Space Time),提出了一种逐天线检测的高斯近似算法:即对其中一个发送信号计算最大后验概率,把其他所有发送天线上的信号当作干扰. 该算法具有很低的计算复杂度,且可在 IDM-ST 系统下获得非常好的性能,但将其应用于 Turbo-BLAST 系统时,存在收敛速度相对较慢、性能损失较大等问题.

笔者利用高斯近似的基本原理,提出一种新型的分组高斯近似检测算法(G-GA, Group Gaussian Approximation). 该方法首先将各发送信号分成两组,将其中一组发送信号的叠加近似为高斯随机变量,然后对另一组信号进行最大后验概率译码. 该方法可适用于任何调制方式,且不需要搜索所有信号组合,能进一步降低计算复杂度,同时具有相对较快的收敛速度,文[4]中方法可看作笔者所提方法的一个特例.

1 系统模型

本文中采用的空时比特交织调制系统的模型如图 1 所示,信息序列 a 经信道编码后产生码序列 c ,该码序列经交织器和串并变换处理后,送入对应的信号映射器进行调制,得到 N 个发送信号 $x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^N$, 设所采用调制方式中包含 2^Q 个信号点,则发送信号 x_t^n 的二进制序列表示为 $u_t^n = (u_t^{n,1}, u_t^{n,2}, \dots, u_t^{n,Q})$.

第 j 根接收天线上的信号为
$$r_t^j = \sum_{i=1}^N \alpha_{i,j} x_t^i + \eta_t^j \quad (1)$$

其中 $\alpha_{i,j}$ 为第 i 根发送天线与第 j 根接收天线之间的信道衰落系数,服从均值为零,方差为 N_0 的复高斯分布,且对于不同的 i 和 $j, \alpha_{i,j}$ 统计独立.

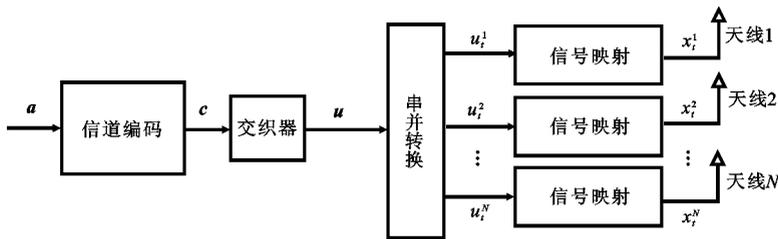


图 1 Turbo-BLAST 系统模型

若接收端可准确估计信道信息,则有[5]

$$L(u_t^{n,l}) = \log \frac{\sum_{\forall s, s_{n,l}=1} p(r_t^1, \dots, r_t^M | \{\alpha_{i,j}\}) \prod_{n=1}^N \prod_{\substack{l'=1 \\ l' \neq l}}^Q P_r(u_t^{n,l'})}{\sum_{\forall s, s_{n,l}=0} p(r_t^1, \dots, r_t^M | \{\alpha_{i,j}\}) \prod_{n=1}^N \prod_{l'=1}^Q P_r(u_t^{n,l'})} \quad (2)$$

由式(2),最优 MIMO 检测算法计算每个比特的对数似然比时,需要遍历所有 2^{QN} 种可能的符号序列,计算复杂度随发送天线数和信号点个数的增加而指数增加. 为降低计算复杂度,下面给出一种分组高斯近似检测算法.

2 分组高斯近似检测算法

2.1 分组高斯近似基本原理

为降低计算复杂度,可将各天线的发送信号进行分组检测,即将天线 $\gamma_{G+1}, \gamma_{G+2}, \dots, \gamma_N$ 上发送信号的叠加作为干扰,来检测天线 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_G$ 上的发送信号,式(1)改写为

$$r_i^j = \sum_{i=1}^G \alpha_{\gamma_i, j} c_i^{\gamma_i} + \sum_{i=G+1}^N \alpha_{\gamma_i, j} c_i^{\gamma_i} + \eta_i^j = \sum_{i=1}^G \alpha_{\gamma_i, j} c_i^{\gamma_i} + \zeta_i^j, \quad (3)$$

其中 $\zeta_i^j = \sum_{i=G+1}^N \alpha_{\gamma_i, j} c_i^{\gamma_i} + \eta_i^j$. 图 1 中的交织器足够大时, 可认为各发送信号 $x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^N$ 是独立同分布的, 因而

由中心极限定理, 可认为 $\sum_{i=G+1}^N \alpha_{\gamma_i, j} c_i^{\gamma_i}$ 为服从高斯分布的随机变量. 根据该结论, ζ_i^j 为高斯随机变量, 且均值为

$$E(\zeta_i^j) = \sum_{i=G+1}^N \alpha_{\gamma_i, j} E(c_i^{\gamma_i}), \quad (4)$$

方差为

$$V(\zeta_i^j) = \sum_{i=G+1}^N |\alpha_{\gamma_i, j}|^2 V(c_i^{\gamma_i}) + N_0. \quad (5)$$

由于

$$E(c_i^{\gamma_i}) = \sum_{s_j \in S} f(s_j) P(c_i^{\gamma_i} = f(s_j)) = \sum_{s_j \in S} f(s_j) \prod_{l=1}^Q P_r(u_i^{\gamma_i, l}), \quad (6)$$

$$V(c_i^{\gamma_i}) = \sum_{s_j \in S} |f(s_j)|^2 P(c_i^{\gamma_i} = f(s_j)) - |E(c_i^{\gamma_i})|^2, \quad (7)$$

因而, 给定 $c_1^{\gamma_1}, c_1^{\gamma_2}, \dots, c_1^{\gamma_G}, r_1^j$ 可看作均值为 $\sum_{i=1}^G \alpha_{\gamma_i, j} c_i^{\gamma_i} + E(\zeta_i^j)$, 方差为 $V(\zeta_i^j)$ 的高斯随机变量, 有

$$P(r_1^j | c_1^{\gamma_1}, \dots, c_1^{\gamma_G}) = \frac{1}{\pi V(\zeta_i^j)} \exp\left[-\frac{\left|r_1^j - \sum_{i=1}^G \alpha_{\gamma_i, j} c_i^{\gamma_i} - E(\zeta_i^j)\right|^2}{V(\zeta_i^j)}\right] \quad (8)$$

和

$$P(r_1^1, \dots, r_1^M | c_1^{\gamma_1}, \dots, c_1^{\gamma_G}) = \exp\left[-\sum_{j=1}^M \frac{\left|r_1^j - \sum_{i=1}^G \alpha_{\gamma_i, j} c_i^{\gamma_i} - E(\zeta_i^j)\right|^2}{V(\zeta_i^j)}\right] \prod_{j=1}^M \frac{1}{\pi V(\zeta_i^j)}. \quad (9)$$

2.2 分组高斯近似检测算法

利用式(4)~(9), 式(2)中的对数似然比计算可改写为

$$L(u_i^{k, l}) = \log \frac{\sum_{\forall u_{\gamma, k, l}=1} \exp\left[-\sum_{j=1}^M \frac{\left|r_1^j - \sum_{i=1}^G \alpha_{\gamma_i, j} c_i^{\gamma_i} - E(\zeta_i^j)\right|^2}{V(\zeta_i^j)}\right] \prod_{k=1}^G \prod_{\substack{l'=1 \\ l' \neq l}}^Q P_r(u_i^{\gamma_i, l'})}{\sum_{\forall u_{\gamma, k, l}=0} \exp\left[-\sum_{j=1}^M \frac{\left|r_1^j - \sum_{i=1}^G \alpha_{\gamma_i, j} c_i^{\gamma_i} - E(\zeta_i^j)\right|^2}{V(\zeta_i^j)}\right] \prod_{k=1}^G \prod_{\substack{l'=1 \\ l' \neq l}}^Q P_r(u_i^{\gamma_i, l'})}, \quad (10)$$

利用式(10), 文中采用的分组高斯近似迭代译码算法如图 2 所示. 首先分组高斯近似检测器利用先验信息 $\{\tilde{L}(u_i^{\gamma_i, l'})\}, i = G+1, \dots, N$ 计算 ζ_i^j 的均值 $E(\zeta_i^j)$ 和方差 $V(\zeta_i^j)$, 所得结果与 $\{\tilde{L}(u_i^{\gamma_i, l'})\}, i = 1, \dots, G$ 一起送入

对数似然比计算器得到 G 组后验信息 $\{L(u_i^{\gamma_i, l'})\}, i = 1, \dots, G$. 该过程需重复 $\lceil N/G \rceil$ 次, 以得到所有 N 组后验信息 $\{L(u_i^{\gamma_i, l'})\}$, 其中 $i = 1, 2, \dots, N, \lceil N/G \rceil$ 表示大于 N/G 的最小整数. 所得后验信息经交织器交织后送入信道译码器, 并产生外信息 $\{\tilde{L}(c_i)\}$, 该外信息经解交织后作为下一次迭代的先验信息送入分组高斯检测器.

在第一次迭代时, $\{\tilde{L}(u_i^{\gamma_i, l'})\}, i = 1, \dots, N$ 的值初始化为零.

2.3 与最优 MIMO 检测的复杂度比较

当信号星座图中包含 2^Q 个信号点, 发送天线数为 N 时, 最优 MIMO 检测算法需要遍历所有 2^{QN} 种 N 维符号向量来计算每个比特的对数似然比. 采用本文中所提算法时, 若每次对 G 个发送信号计算对数似然比, 同时将其余 $N-G$ 个发送信号看作干扰, 则 G -GA 算法需要遍历 $\lceil N/G \rceil 2^{QN}$ 种 G 维符号向量来计算每个比特的对数似然比. 例如, 若采用 4 天线 4PSK 调制方式, 最优 MIMO 检测算法需要遍历所有 256 种四维符号向量. 若采用本文中的 G -GA 算法, $G=1$ 时, 只需计算 $\lceil N/G \rceil 2^{QN} = 16$ 个一维向量即可得到每个比特的对数似然比, 复杂度仅为最优 MIMO 检测的 $1/16$ 左右; 当 $G=2$ 时, 只需计算 $\lceil N/G \rceil 2^{QN} = 32$ 个二维向量即可得到每个比特的对数似然比, 复杂度仅为最优 MIMO 检测的 $1/8$ 左右.

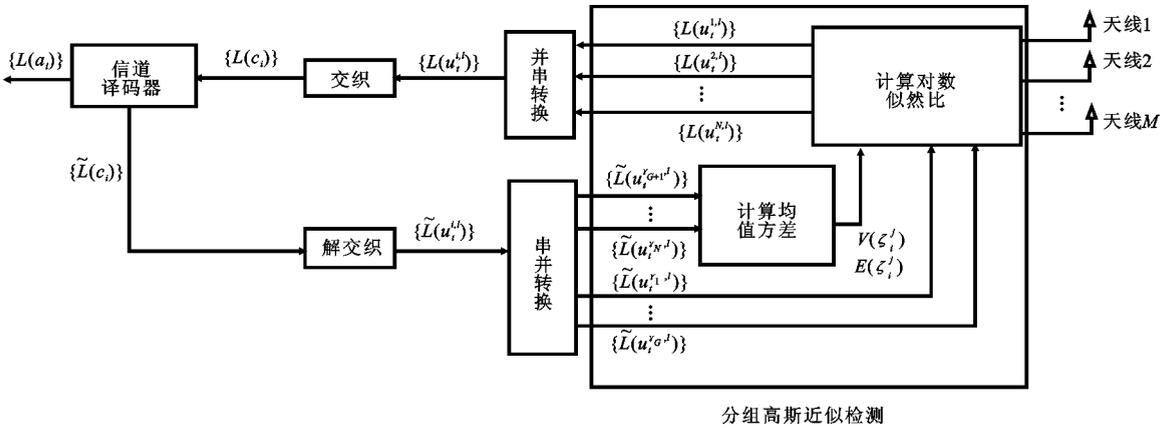


图 2 分组高斯近似迭代检测算法

3 仿真及性能分析

图 3 给出了两天线 Turbo-BLAST 系统分别不同检测算法的性能比较,具体仿真参数为:接收天线数分别为 2,3 和 4;调制方式为 QPSK;Turbo-BLAST 的外码采用生成多项式为(7, 5)的1/2码率卷积码;卷积码和 V-BLAST 之间的随机交织器长度为 2048;软输入软输出解调算法分别采用最优 MIMO 检测和分组高斯近似(G-GA)检测,其中 G-GA 检测算法取 $G = 1$;解调器与信道译码器之间的迭代次数为 5 次.

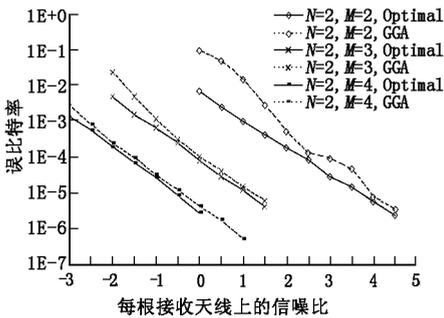


图 3 两天线 Turbo-BLAST 系统的性能比较

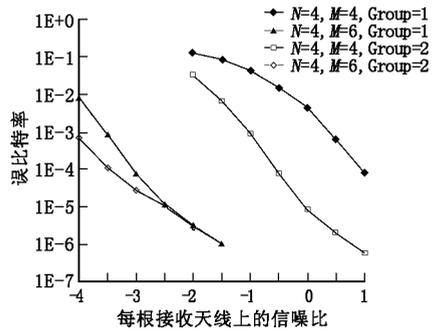


图 4 四天线 Turbo-BLAST 系统的性能比较

图 4 给出了四天线 Turbo-BLAST 系统的性能,具体仿真参数为:接收天线数分别为 4 和 6;调制方式为 QPSK;Turbo-BLAST 的外码采用生成多项式为(7, 5)的1/2码率卷积码;卷积码和 V-BLAST 之间的随机交织器长度为 2048;软输入软输出解调算法采用 G-GA 检测,其中 $G = 1$ 和 $G = 2$. 对于 $G = 2$ 的情况,把第 1 和第 2 根发送天线对应的信号看作一组,第 3 和第 4 根发送天线对应的信号看作一组.

分析图 3 和图 4,可得到以下几个结论:

(1) 当接收天线数等于发送天线数时,采用 G-GA 算法的性能比采用最优 SISO 检测时略有损失,但随着接收天线数的增加,二者之间的差距了逐渐缩小.由图 3,当 $M = 4$, BER 为 10^{-5} 时, TURBO-BLAST 系统采用 G-GA 算法的性能与采用最优 SISO 算法的性能几乎重合.

(2) 分组数 G 的大小对性能影响较大,当 $N = 4, M = 4$, BER 为 10^{-5} 时, $G = 2$ 的性能与 $G = 1$ 有至少 1 dB 的编码增益. 随着接收天线数的增加,两者之间的性能差距逐渐缩小,当 $M = 6$ 时, $G = 2$ 只在小信噪比时表现出较好的性能.

4 结 论

针对 BLAST 结构,利用分组高斯近似原理,设计了一种软输入软输出解调算法.虽然该算法的复杂度

仅为最优 MIMO 检测的几分之一甚至十几分之一,但当接收天线数足够大时,其性能仍可逼近最优 MIMO 检测.

参考文献:

- [1] Hochwald M B, Brink S T. Achieving Near Capacity on a Multiple-antenna Channel [J]. IEEE Trans on Communications, 2003, 51(3): 389-399.
- [2] Jia Y, Andrieu C, Piechocki R J, et al. Gaussian Approximation Based Mixture Reduction for Near Optimum Detection in MIMO System[J]. IEEE Communication Letters, 2005, 9(11): 997-999.
- [3] Choi W J, Negi R, Cioffi J M. Combined ML and DFE Decoding for the V-BLAST System[C]//2000 IEEE International Conference on Communications: Vol 3. Piscataway: IEEE, 2000: 1 243-1 248.
- [4] Wu K Y, Leung W K, Liu L H, et al. Iterative Detection of Interleaver Based Space-time Codes[J]. IEICE Trans on Communications, 2004, E87-B1(11): 3 173-3 179.
- [5] Stefanov A, Duman T M. Turbo Coded Modulation for Systems with Transmit and Receive Antenna Diversity[C]// IEEE Global Telecommunications Conference. Rio de Janeiro: IEEE, 1999: 2 336-2 340.
- [6] Wang Chao, Liao Guisheng, Zhang Linrang, et al. Overview of Space-time Coding and Its Prospect[J]. Journal of Xidian University, 2003, 30(5): 634-639.

(编辑: 李维东)

《西安电子科技大学学报》2007 年第 2 期拟刊登的部分文章

一种新的图像镶嵌技术	杨占龙, 郭宝龙
基于三角面元数据模型的 FDTD 网格生成技术	杨利霞, 葛德彪, 白剑, 等
多视角 ISAR 成像研究	王琦, 李亚超, 邢孟道, 等
一种改进的 NAS-RIF 算法	刘宁, 楼顺天
对线性调频雷达的锯齿波加权调频干扰	张煜, 杨绍全, 崔艳鹏
X 型极化分集系统中的互耦分析	徐志, 刘其中, 孙保华, 等
基于预均衡的正交循环码 M 元 MC-CDMA 系统研究	褚振勇, 易克初, 周途
利用环上的椭圆曲线实现基于身份的加密体制	张宁, 辛向军, 肖国镇
永磁微加速度开关设计与仿真	朱应敏, 贾建援, 田文超, 等
基于 SVM 和相关反馈技术的肿块检测算法	王颖, 高新波
时变多径 Rayleigh 衰落信道中的匹配滤波界	韩芳明, 张贤达
一类量子循环码的构造方法	李卓, 邢莉娟, 王新梅
无线传感器网络中邻居发现及链路通信质量预测技术的研究	杜军朝, 刘惠, 陈平
抑制 OFDM 系统峰值再生的边带信息传输算法	杨刚, 黄思宁, 姜勇, 等
广义离散随机非线性系统的递推算法	张卓奎, 陈慧婵
等效电磁流边缘分量表达式的虚假奇点处理	徐云学, 龚书喜
快速有效的虹膜图像分割方法	路陈红, 卢朝阳
非对称 GALS 系统异步接口设计	徐阳扬, 周端, 杨银堂, 等
共形异向介质覆层在单极子天线上的应用	翁子彬, 焦永昌, 王乃彪
一种基于 Nash 均衡的路由器队列管理方法	张惠娟, 周利华, 翟鸿鸣
基于自适应距离度量的近似重复记录检测	黄健斌, 姬红兵, 孙鹤立
恒流 LDO 型白光 LED 驱动芯片的设计研究	刘帘曦, 杨银堂, 朱樟明
V-BLAST OFDM 系统中一种新的译码算法	战金龙, 廖桂生, 李国民
基于迭代扩展卡尔曼的粒子滤波新方法	李良群, 姬红兵, 罗军辉