

MIMO 系统中的迭代分组 MAP 检测算法

杨 远 孙 岳 胡军锋 张海林

(西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室 西安 710071)

摘 要: 该文提出了在分组 MAP 检测器内部进行干扰信息更新和检测信息迭代反馈的检测算法。在 MIMO 系统基本的分组 MAP 检测算法基础上, 利用先检测分组产生的后验信息替代先验信息提高干扰信号的估计精确度, 进一步可以使用迭代反馈的方法在检测器内部进行反馈检测分组的后验信息, 从而提高了检测信号的分集度。仿真结果表明在未编码系统中改进的分组检测方法能够显著地提高系统误码率性能, 在编码系统中能够加快整个系统的收敛。

关键词: 多输入多输出(MIMO)系统; 分组最大后验概率检测; 迭代检测

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)12-3027-04

Iterative Group-Based MAP Detection for MIMO Wireless Systems

Yang Yuan Sun Yue Hu Jun-feng Zhang Hai-lin

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

Abstract: Based on the basic group-based Maximum a Posterior(MAP) detector, a novel detection scheme is proposed that uses a posterior information from the detected groups instead of a priori information from the decoder. The new scheme can improve the estimation precision of the interference. Further an iterative detector that uses a posterior information from last detection is presented. The iterative detector can fully use the output information from the detector and have a performance improvement further. Simulation results show that the new detectors have a significant performance gain over basic group-based MAP algorithm in uncoded systems and have a faster convergence in coded systems.

Key words: MIMO; Group-based MAP detection; Iterative detection

1 引言

多天线的使用能够极大地提高系统的容量, 而贝尔实验室的分层传输结构(BLAST)是一种简单有效的传输结构。在接收端如何分离各发射天线的信号是实现BLAST系统容量的关键。目前的方法有简单的零化干扰抵消(N/C)方法^[1], 最优的MAP算法, 近似最优的QR分解之后的M算法^[2](QRD-M)和Sphere Decoder算法(SD)以及分组MAP算法^[3]等算法。在这些算法中N/C算法最简单, 性能也最差, MAP算法性能最好但复杂度最高, SD算法和QRD-M算法能够接近于MAP算法的性能, 而分组MAP算法在MAP算法和MMSE线性检测器之间取得折中, 而且能够应用于信道缺秩的情况。对于与编码结合的多天线接收机, 迭代检测解码器成为一种有效的接近系统容量的实现方法^[4, 5]。此时, 要将原来应用在未编码系统中的检测器用于迭代检测系统时, 需要考虑如何利用先验信息并且实现软输入软输出。在这些检测器的设计中, 已经有基于MMSE准则的检测器^[4]、应用SD算法的LSD检测器^[6]、使用QRD-M算法的迭代树搜索(ITS)检测器^[2]和使用分组MAP算法的检测

器^[3]。而在这些算法当中, 分组MAP算法适用于信道满秩和缺秩的情况, 而且能够通过灵活设置分组的大小来取得性能和复杂度之间的折中。

在文献[3]中提出的分组最大后验概率检测算法并没有充分利用检测器中得到的信息, 本文主要通过对比已检测分组软信息的充分利用和检测器内迭代反馈方式来提高分组MAP算法的性能。在基本的分组MAP算法基础上, 未检测分组可以利用已检测分组的后验信息, 大大提高检测器的性能, 而系统复杂度几乎没有改变; 在全部分组都检测完成之后, 可以将得到的全部分组的软信息反馈至分组检测器代替先验信息, 从而进一步提高系统的性能。在使用迭代检测解码的MIMO系统中, 使用改进后的检测器能够更快地使系统收敛。

本文的剩余部分将安排如下: 第2节将介绍整个系统的模型。第3节将说明改进的分组MAP算法。性能仿真在第4部分给出。最后总结全文。

2 系统模型

系统模型如图1所示, 假定系统有 N_t 根发射天线和 N_r 根接收天线, 每个发射信号矢量 \mathbf{s} 由 N_t 个符号组成, 每个符号从符号集 \mathcal{S} 中选出, 符号集大小为 2^{M_c} , 每符号由 M_c 个

编码比特组成, 那么每发射信号矢量 \mathbf{s} 由 $N_t M_c$ 个编码比特构成的向量 \mathbf{x} 映射得到。每发射信号矢量在经过一个平坦衰落的 MIMO 信道之后得到一个 $N_r \times 1$ 维的接收矢量为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (1)$$

这里的 \mathbf{n} 为 $N_r \times 1$ 维加性白高斯噪声矢量。

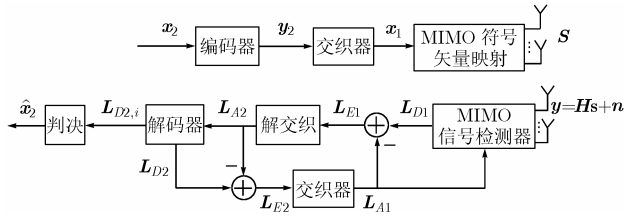


图 1 Turbo-MIMO 系统模型

当在 MIMO 系统中联合考虑编码和检测时, 检测器可以利用由信道编码器引入的比特之间的相关性, 根据信道接收矢量 \mathbf{y} 和信道解码器反馈的先验信息 L_{A1} 进行检测, 而信道解码器根据检测器输出的软信息 L_{A2} 进行解码, 在生成外信息 L_{E2} 之后经过解交织送给检测器, 从而完成了一次联合检测和解码的迭代过程。称这样的一个联合检测和解码的 MIMO 系统为 Turbo-MIMO 系统。

3 改进的分组 MAP 检测算法

对经过信道编码之后的比特序列 \mathbf{x} 中的每一比特 x_k , 利用序列 \mathbf{x} 中各个比特之间的独立性, 根据贝叶斯准则, 比特 x_k 的后验信息可以写为先验信息 $L_{A1}(x_k)$ 和外信息 $L_{E1}(x_k/\mathbf{y})$ 之和的形式:

$$L_{D1}(x_k | \mathbf{y}) = L_{A1}(x_k) + L_{E1}(x_k | \mathbf{y}) \quad (2)$$

其中外信息可以展开为

$$L_{E1}(x_k | \mathbf{y}) = \ln \frac{\sum_{\mathbf{x} \in \mathcal{X}_{k,+1}} p(\mathbf{y} | \mathbf{x}) \exp(\frac{1}{2} \mathbf{x}_{[k]}^T L_{A,[k]})}{\sum_{\mathbf{x} \in \mathcal{X}_{k,-1}} p(\mathbf{y} | \mathbf{x}) \exp(\frac{1}{2} \mathbf{x}_{[k]}^T L_{A,[k]})} \quad (3)$$

这里的 $\mathcal{X}_{k,+1}$ 代表了 $2^{N_t M_c - 1}$ 种可能的比特矢量 \mathbf{x} 的集合, 其中每一矢量中的 $x_k = +1$ 。

$$\mathcal{X}_{k,+1} = \{\mathbf{x} | x_k = +1\}, \mathcal{X}_{k,-1} = \{\mathbf{x} | x_k = -1\} \quad (4)$$

式(3)中的 $\mathbf{x}_{[k]}$ 代表了 \mathbf{x} 矢量除去第 k 个元素后所组成的矢量, 而 $L_{A,[k]}$ 则代表了与 $\mathbf{x}_{[k]}$ 内元素相应的先验信息。

根据分组 MAP 算法, 首先将整个 N_t 个发射信号分为 N_g 组, 每组含有 N_s 个发射信号, 即 $N_t = N_g N_s$ 。设定当前检测第 i 组信号, 那么接收信号可以表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}_{G_d} \mathbf{s}_{G_d} + \mathbf{H}_{G_i} \mathbf{s}_{G_i} + \mathbf{H}_{G_u} \mathbf{s}_{G_u} + \mathbf{n} \quad (5)$$

此时 G_d 代表第 1 到第 $i-1$ 组的已检测信号, 而 G_u 代表从第 $i+1$ 到第 N_g 组的未检测信号, G_i 代表当前检测的第 i 个分组信号。设定从信道解码反馈来的先验信息为 $L_{A1} = [L_{A1}(x_{1,1}), L_{A1}(x_{1,2}), \dots, L_{A1}(x_{1,M_c}), \dots, L_{A1}(x_{N_t,1}), \dots, L_{A1}(x_{N_t,M_c})]$, 而此时注意到已检测的第 1 个分组到第 $i-1$ 个分组的后验信息已经

更新, 由检测器得到更新后的后验信息为 $L_{D1,G_d} = [L_{D1}(x_{1,1}), \dots, L_{D1}(x_{1,M_c}), L_{D1}(x_{2,1}), \dots, L_{D1}(x_{(i-1),M_c})]$, 那么利用检测器得到 $i-1$ 个分组的后验信息和 $N_g - i$ 个未检测分组的先验信息 L_{A1,G_u} , 得到第 j 个符号的第 k 个比特的概率分布:

$$\left. \begin{aligned} P(x_{j,k} = +1) &= 1/(1 + \exp(L(x_{j,k}))) \\ P(x_{j,k} = -1) &= \exp(L(x_{j,k}))/[1 + \exp(L(x_{j,k}))] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

然后得到第 j 个符号概率:

$$P(s_j) = \prod_{k=0}^{M_c-1} P(x_{j,k} = c_k) \quad (7)$$

随后就可以得到该符号的均值和方差:

$$\left. \begin{aligned} \bar{s}_j &= E(s_j) = \sum s_j P(s_j) \\ \omega_j^2 &= E[|s_j - \bar{s}_j|^2] = E[|s_j|^2] - [\bar{s}_j]^2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

接着从干扰信号的方差计算得到有色噪声方差矩阵, 利用特征值分解, 得到白化滤波器系数 \mathbf{F} (记有色噪声为 $\mathbf{w} = \mathbf{H}_G \mathbf{s}_G + \mathbf{n}$, 其均值为 $\bar{\mathbf{w}}$):

$$\mathbf{R}_w = E[(\mathbf{w} - \bar{\mathbf{w}})(\mathbf{w} - \bar{\mathbf{w}})^H] = \mathbf{H}_G \mathbf{\Omega} \mathbf{H}_G^H + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (9)$$

这里 $\mathbf{\Omega} = \text{diag}(\omega_1^2, \dots, \omega_{(i-1)N_s}^2, \omega_{iN_s+1}^2, \dots, \omega_{N_t}^2)$ 。

$$\mathbf{R}_w = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{U}^H \quad (10)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{S}^{-1/2} \mathbf{U}^H$$

最后使用经过白化的信道观测值 $\mathbf{F}(\mathbf{y} - \bar{\mathbf{w}})$, 得到 MIMO 符号中每比特的后验信息:

$$\begin{aligned} L_{D1}(x_k | \mathbf{y}) &= \ln \frac{\sum_{\mathbf{x}_{G_i} \in \mathcal{X}_{k,+1}} p(\mathbf{y} | \mathbf{x}) \exp(\frac{1}{2} \mathbf{x}^T L_{A1})}{\sum_{\mathbf{x}_{G_i} \in \mathcal{X}_{k,-1}} p(\mathbf{y} | \mathbf{x}) \exp(\frac{1}{2} \mathbf{x}^T L_{A1})} \\ &= \ln \frac{\sum_{\mathbf{x}_{G_i} \in \mathcal{X}_{k,+1}} \exp\left(\frac{-\|\mathbf{F}(\mathbf{y} - \bar{\mathbf{w}} - \mathbf{H}_{G_i} \mathbf{s}_{G_i})\|^2}{2}\right) \exp(\frac{1}{2} \mathbf{x}^T L_{A1})}{\sum_{\mathbf{x}_{G_i} \in \mathcal{X}_{k,-1}} \exp\left(\frac{-\|\mathbf{F}(\mathbf{y} - \bar{\mathbf{w}} - \mathbf{H}_{G_i} \mathbf{s}_{G_i})\|^2}{2}\right) \exp(\frac{1}{2} \mathbf{x}^T L_{A1})} \end{aligned} \quad (11)$$

至此完成了一次检测过程。与文献[4]中方法相比, 不但利用了从解码器反馈来的先验信息, 而且利用了先检测分组得到的后验信息, 然后用已检测分组的后验概率信息和未检测分组的先验概率信息得到干扰信号的概率信息。显然这时利用了已进行了 MAP 检测得到的后验概率信息是要优于只使用先验信息的方法, 它能更充分利用已有的信息来近似干扰信号和生成白化滤波器系数。特别在初始检测, 先验信息为零时, 利用已检测分组后验信息会有更明显的性能优势。

已检测分组第 j 符号第 k 比特得到的后验概率信息为 $L_{D1}(x_{j,k})$, 它代替先验信息 $L_{A1}(x_{j,k})$ 来得到干扰信号的概率信息。对分组 i , 其干扰信号的软信息矢量为

$$\mathbf{L}_{G_i} = [L_{D1}(x_{1,1}), \dots, L_{D1}(x_{(i-1)N_s, M_c}), L_{A1}(x_{iN_s+1,1}), \dots, L_{A1}(x_{N_g N_s, M_c})] \quad (12)$$

此时, 由于分组之间有先后的检测顺序, 信号的不同分

组方法对检测结果也会有影响。文献[4]中的检测算法在 $N_g = 1$ 时和 MAP 算法等效, 在 $N_g = N_t$ 时和 MMSE 算法等效。而改进后的算法在 $N_g = 1$ 时仍和 MAP 算法等效, 在 $N_g = N_t$ 时和使用 MMSE 准则的 V-BLAST 算法等效。

继续观察, 可以注意到在所有分组检测完成之后, 前面已检测分组并没有利用未检测分组已经更新的信息, 对第 i 组信号来说, 检测器并没有利用第 $i + 1$ 组至第 N_g 组的检测结果。所以可以把本次检测得到的后验信息反馈至第一个分组, 利用更新的后验信息和解码器提供的先验信息重新计算干扰信号的均值和方差, 再进行一次检测过程。这样在检测器内部完成了一次迭代过程。这样, 对分组 i , 第 k 次检测使用的干扰信号的软信息矢量为

$$\mathbf{L}_{\bar{G},k} = [L_{D1,k}(x_{1,1}), \dots, L_{D1,k}(x_{(i-1)N_s, M_c}), L_{D1,k-1}(x_{iN_s+1,1}), \dots, L_{D1,k-1}(x_{N_g N_s, M_c})] \quad (13)$$

这样的一个检测器内迭代反馈的 MIMO 检测器由图 2 表示。

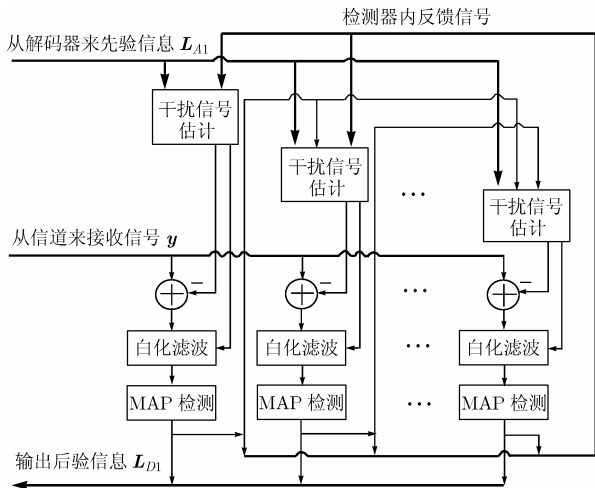


图 2 迭代分组 MAP 检测器模型

4 系统性能仿真结果

这里给出编码和未编码系统中改进的分组检测算法和最初的分组检测算法的误码率性能仿真。假定瑞利慢衰落信道, 并且接收机具有完全的信道信息。假定信道矩阵 \mathbf{H} 是独立同分布的复高斯随机变量组成, 其均值为零方差为 1, 设发射信号每符号的平均能量为 E_s/N_t , 那么每接收天线接收到的平均能量为 E_s 。和文献[6]一样定义接收天线上的比特信噪比为: $E_b/N_0 = (E_s N_r)/(N_t M_c R N_0)$, 这里的 R 为编码速率。编码系统采用 1/2 码率的 Turbo 编码, 其记忆长度为 2, 生成多项式系数为 (5, 7), Turbo 码中使用的随机交织器长度为 2048。对于每一个接收到的 Turbo 码块, 要在 MIMO 检测器和信道解码器之间进行 4 次迭代, Turbo 码解码器内要进行 8 次迭代。选择映射的星座为 QPSK, 映射方式为格雷码映射。

这里用 GMAP 指文献[3]中的分组检测算法, 而用 Improved GMAP 指使用已检测分组后验信息代替先验信息的分组检测算法, IGMAP 算法是指进行检测器内部迭代反馈的算法, iter j 代表 IGMAP 算法在检测器内进行了 j 次迭代。

首先给出 $N_t = 8$ 和 $N_r = 8$ 时未编码 MIMO 系统的误码率仿真。图 3 给出了分组数 $N_g = 4$ 时的误码率仿真。图中虚线给出的是使用随机分组方法进行分组的检测算法, 而实线则都是根据信道衰减大小排序而进行的分组。可以看出, 即使随机分组, Improved GMAP 算法相对于 GMAP 算法也能够获得 3.5dB 左右的增益, 而分组方法对于 IGMAP 算法的性能已经没有太大影响, 只是在高信噪比时依信道进行分组的算法要好于随机分组算法 1.5dB 左右。在余下的仿真中都按照信道衰减大小进行分组。从图 3 中可以看出使用按信道分组的 Improved GMAP 算法相对于 GMAP 算法能够获得 7~8dB 的增益, 而且没有明显增加检测器的复杂度, 说明在没有先验信息的情况下使用已检测分组后验信息能大大提高检测器性能。当使用检测器内部迭代反馈时, 经过一次迭代之后在误码率 10^{-5} 时能够获得 4dB 的增益, 而在经过第 2 和第 3 次迭代之后并不能够明显提高系统性能。

图 4 给出在信道缺秩情况下不同算法在未编码 MIMO 系统下的误码率性能仿真。这里 $N_t = 8, N_r = 6, N_g = 4$ 。从图中可以看出 GMAP 算法在 $N_g = 4$ 时有较高的错误平底, Improved GMAP 算法能降低系统的错误平底, IGMAP 算法在一次迭代之后相对于 Improved GMAP 算法能够大大降低系统错误平底, 而两次迭代相对于一次迭代在低信噪比时能够获得大约 1dB 的增益, 在 3 次迭代之后并没有明显的性能改善。

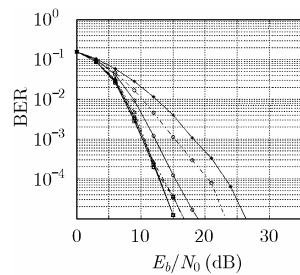


图 3 $N_t = 8$ 和 $N_r = 8$ 时未编码 MIMO 系统在 $N_g = 4$ 时的误码率性能

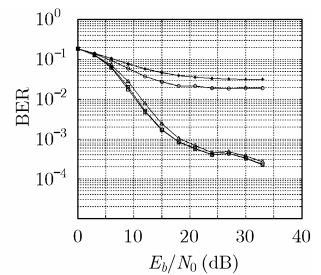


图 4 $N_t = 8$ 和 $N_r = 6$ 时未编码 MIMO 系统在 $N_g = 4$ 时的误码率性能

图 5 和图 6 给出的是使用 Turbo 编码的 MIMO 系统的误码率曲线。从图 5 中可以看到在 $N_t = 8$ 、 $N_r = 6$ 和 $N_g = 4$ 时, Improved GMAP 算法和 IGMAP 算法相对于 GMAP 算法在没有外部迭代时可以分别得到 0.4dB 和 1dB 的增益。在进行了 4 次联合检测解码迭代之后 Improved GMAP 算法和 IGMAP 算法相对于 GMAP 算法仍有 1dB 左右的增益。这说明即使使用了解码器来的先验信息之后, Improved GMAP 算法和 IGMAP 算法也能够更好的利用信道接收信息和先验信息使接收机更快的收敛。同样在图 6 中可以看到相似的结果, 只是由于分集度的增加, Improved GMAP 算法和 IGMAP 算法的性能增益不如图 5 明显。

从上面的仿真中可以看出, 已检测分组后验信息的使用能大大提高检测器系统性能, 而复杂度并无明显增加, 而检测器内部迭代反馈的使用使得系统性能有进一步的提高, 特别对于缺秩系统来说, 增益更为明显。当考虑迭代检测解码时, Improved GMAP 算法和 IGMAP 算法使得整个系统能够更快的收敛。

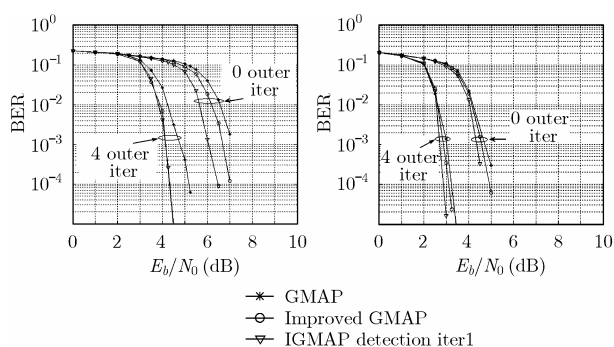


图 5 $N_t = 8$ 和 $N_r = 6$ 时 Turbo 编码 MIMO 系统在 $N_g = 4$ 时的误码率性能

图 6 $N_t = 8$ 和 $N_r = 8$ 时 Turbo 编码 MIMO 系统在 $N_g = 4$ 时的误码率性能

5 结束语

在软输入软输出的分组最大似然 MIMO 检测器的设计中, 利用已检测分组的后验信息能够提高干扰信号的估计精

确度, 使得检测器性能有显著提高, 而复杂度没有明显增加。在检测器内进行检测信息的迭代反馈, 使检测器能够充分利用自身得到的信息进一步提高检测精度, 但这也增加了检测器的时延和复杂度。在和编码系统联合考虑时, 改进的分组 MAP 检测器也拥有性能上的优势。由此, 在 MIMO 系统的检测中在用到信号的估计信息时更倾向于使用所有已得到的信息而并非只有先验信息。

参考文献

- [1] Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communication in fading environments when using multiple antennas. *Bell Labs Tech Journal*, 1996, 1(2): 41-59.
- [2] De Jong Y L C and Willink T J. Iterative tree search detection for MIMO wireless systems. *IEEE Trans. on Commun.*, 2005, 53(6): 930-935.
- [3] Elkhazin A, Plataniotis K N, and Pasupathy S. Reduced-dimension MAP Turbo-BLAST detection. *IEEE Trans. on Commun.*, 2006, 54(1): 108-118.
- [4] Sellathurai M and Haykin S. Turbo-BLAST for wireless communications: theory and experiments. *IEEE Trans. on Sig. Proc.*, 2002, 50(10): 2538-2546.
- [5] Haykin S, Sellathurai M, De Jong Y L C, and Willink T J. Turbo-MIMO for wireless communications. *IEEE Communications Magazine*, 2004, 42(10): 48-53.
- [6] Hochwald B M and Ten Brink S. Achieving near-capacity on a multiple-antenna channel. *IEEE Trans. on Commun.*, 2003, 51(3): 389-399.

杨 远: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为迭代检测和多天信号处理。

孙 岳: 男, 1979 年生, 讲师, 博士生, 研究方向为协作通信。

胡军锋: 男, 1976 年生, 博士生, 主要研究方向包括 MIMO 通信系统、LDPC 码、通信信号处理。

张海林: 男, 1961 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为宽带无线通信。