一种低复杂度的 MIMO 迭代检测算法 *

徐 琳, 吴玉成, 李江雯
(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 为了降低 MIMO 系统联合检测算法的计算复杂度并保证系统性能,在球形译码算法的搜索中引入软信息构成改进的 FP-MAP 算法。该算法在计算信息符号的最大似然解时利用了其软先验信息,并在迭代过程中用以获得软外信息。分析与仿真结果表明,在同等的条件下,FP-MAP 与 LSD-MAP 算法相比性能相当,但复杂度有所降低,且与广泛使用的 SIC-MMSE 算法相比具有明显的性能增益。

关键词: 联合检测; 球形译码; 软先验信息; 最大似然; 软外信息
中图分类号: TN911.7 **文献标志码**: A **文章编号**: 1001-3695(2012)02-0739-02
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.02.090

Low complexity MIMO iterative detection algorithm

XU Lin, WU Yu-cheng, LI Jiang-wen
(*College of Communication Engineering*, *Chongqing University*, *Chongqing* 400044, *China*)

Abstract: In order to reduce complexity of the joint detection algorithm in MIMO system and to guarantee performance of the system, this paper proposed the FP-MAP algorithm, which used the soft information during the searching process of sphere decoding. The algorithm in calculating the maximum likelihood information used its soft priori information, and obtained the soft extrinsic information in the iterative process. Theoretical analysis and simulation shows that, compared with the LSD-MAP algorithm, FP-MAP algorithm has relatively lower complexity, but the BER performance of FP-MAP algorithm is equal to the LSD-MAP algorithm, compared with the SIC-MMSE algorithm, the performance FP-MAP algorithm is superior to SIC-MMSE algorithm.

Key words: joint detection; sphere decoding; soft priori information; maximum likelihood; soft extrinsic information

多输入多输出(MIMO)技术[1,2]能够在高数据速率传输的同时提高系统可靠性,是新一代宽带移动通信系统的核心技术。为保证多天线系统的性能,需要采用高效的联合检测解码技术在多维信号空间进行处理[3]。多维信号空间中的 MAP 比特检测器的复杂度很高,难以实际应用。球形译码算法(sphere decoding)[4,5]通过减小搜索半径大大降低了计算量,且可以达到 MAP 检测器的性能,是 MIMO 系统采用的典型检测方法。

球形译码的复杂度仍然很高,不利于实际实现。文献[6]在球形译码算法的基础上加以修改,设计了列表球形译码算法(LSD),通过列表搜索的方法大大降低空间搜索的复杂度。文献[7]通过简化球形译码算法中不必要的排序和列举来降低球形译码算法复杂度。文献[8]研究了 LSD 算法两种不同搜索方法,提出通过限制对数似然比的动态范围来降低复杂度。本文在列表球形译码搜索过程中引入软信息构成 FP-MAP 算法,以进一步减小计算复杂度和提高检测性能。

1 MIMO 迭代系统模型

假设 n_t 根发送天线和 n_r 根接收天线的 MIMO 系统,每对收发天线间的信道衰落系数是相互统计独立的,输入的数据流被分成 n_t 个子数据流分别在各自特定的天线上发送。在每个时刻接收到的信号为

$$y = Hx + V \tag{1}$$

其中:y 是 $n_r \times 1$ 维的接收信号;$x = (x_1, x_2, \cdots, x_{n_t})^{\mathrm{T}} \in S$ 表示发送信号矢量;S 为信号星座;H 是 $n_r \times n_t$ 维的信道矩阵;V 是 $n_r \times 1$ 维的复高斯随机变量,其均值为 0、方差为 σ^2。

MIMO 检测器需要根据接收信号向量 y 和符号向量 x 的先验信息 $L_{M,a}$ 来计算每一个比特的对数似然信息 $L_{M,p(c_i|y)}$。MAP 比特检测器通过最大化后验概率 $P_{x|y}(x|y)$ 来达到最大似然解(ML)。根据贝叶斯定理,最大化后验概率等效为

$$\arg\max P_{x|y}(x|y) = \arg\max \frac{P_{x|y}(x|y)}{P_x(x)} \tag{2}$$

假设符号 $x_1, x_2, \cdots, x_{n_t}$ 彼此统计独立,则有关系式:

$$P_x(x) = \prod_{k=1}^{n_t} P(x_k) = e^{\sum_{k=1}^{n_t} \log P(x_k)} \tag{3}$$

在接收端已知信道矩阵 H 的条件下,式(2)等效为 AWGN 信道下的最优问题,可以重新写为

$$\min \| y - Hx \| - [\sum_{k=1}^{n_t} \log P(x_k)] \tag{4}$$

2 球形解码算法

2.1 球形译码原理

由于球形译码算法主要基于实数格点,因此需要对上面的接收模型作等效变换,获得其实数表达形式。在此,设 $N_t =$

收稿日期: 2011-06-08; **修回日期**: 2011-07-19 **基金项目**: 中国博士后基金资助项目(20090450787);重庆市教委科技项目(KJ08A09);"211 工程"创新人才培养计划(S-09102)

作者简介:徐琳(1988-),女,安徽宿州人,硕士研究生,主要研究方向为无线通信、信道编码(xl880227@126.com);吴玉成(1971-),男,河南光山人,教授,博士,主要研究方向为无线通信技术;李江雯(1988-),女,河南南阳人,硕士研究生,主要研究方向为无线通信.

$2n_t, N_r = 2n_r$，$\bar{y}$、$\bar{H}$、$\bar{x}$ 和 $\bar{V}$ 分别表示 y、H、x 和 V 的实数表达形式，则有

$$\bar{y} = [\,\mathrm{real}(y)^{\mathrm{T}} \quad \mathrm{imag}(y)^{\mathrm{T}}\,]^{\mathrm{T}}$$
$$\bar{x} = [\,\mathrm{real}(x)^{\mathrm{T}} \quad \mathrm{imag}(x)^{\mathrm{T}}\,]^{\mathrm{T}}$$
$$\bar{V} = [\,\mathrm{real}(V)^{\mathrm{T}} \quad \mathrm{imag}(V)^{\mathrm{T}}\,]^{\mathrm{T}}$$
$$\bar{H} = \begin{bmatrix} real(H) & \mathrm{imag}(H) \\ -\mathrm{imag}(H) & \mathrm{real}(H) \end{bmatrix}$$

则可以得到与式(1)对应的等效实数表达为

$$\bar{y} = \bar{H}\bar{x} + \bar{V} \tag{5}$$

球形译码算法的目的就是找到最大似然解 $\hat{x}_{ml}$，求式(5)最大似然解相当于求解下式的最小化问题：

$$\hat{x}_{ml} = \arg\min \| \bar{y} - \bar{H}\bar{x} \|^2 \tag{6}$$

设 $\bar{y} = \bar{H}\bar{x}$，则：

$$\| \bar{y} - \bar{H}\bar{x} \|^2 = (\hat{x} - \bar{x})^{\mathrm{T}} \bar{H}^{\mathrm{T}} \bar{H} (\hat{x} - \bar{x}) + \bar{y}^{\mathrm{T}} (1 - \bar{H}(\bar{H}^{\mathrm{T}} \bar{H}) \bar{H}^{\mathrm{T}}) \bar{y}$$

其中：$\hat{x} = (\bar{H}^{\mathrm{T}} \bar{H})^{-1} \bar{H}^{\mathrm{T}}) \bar{y}$ 是 $\bar{x}$ 的非约束最大似然解，则 $\bar{x}$ 的约束最大似然解为

$$\hat{x}_{ml} = \arg\min \| \bar{y} - \bar{H}\bar{x} \|^2 = \arg\min (\hat{x} - \bar{x})^{\mathrm{T}} \bar{H}^{\mathrm{T}} \bar{H} (\hat{x} - \bar{x}) \tag{7}$$

为避免穷举搜索，译码时只在半径为 r 的多维球体内搜索满足条件的格点，使得该点到接收信号点的距离小于搜索半径；再用当前得到更小的半径代替前一次的搜索半径，进一步缩小搜索区域。重复这两个步骤找到最大似然解。

2.2　FP-MAP 算法

为降低算法复杂度，文献[6]提出了 LSD-MAP 算法，首先利用球形译码算法搜索获得 N_{cand} 个使半径 r 最小的 x 的值，并将这 N_{cand} 个值组成列表 ξ。搜索过程中保持初始搜索半径不变，找到新的 x 值后与列表 ξ 中原有值相比较。若其半径小于 ξ 中最小的半径，则替换对应的 x 值，否则保持列表 ξ 不变。搜索完成后利用 ξ 中的 N_{cand} 个信号组成新的信号空间替换原有信号空间进行累加运算。

从 LSD-MAP 算法推导过程可以看出，进行列表搜索时没有利用符号 x_k 的软信息。事实上，通过观察式(4)可以发现，在球体搜索的过程中，求解最大似然解 $\hat{x}_{ml}$ 时可以引入符号 x_k 的软先验信息。在以后的每次迭代过程中，软先验信息都可以用来计算比特的外信息。于是，球形译码的搜索约束条件变为

$$(\hat{x} - \bar{x})^{\mathrm{T}} \bar{H}^{\mathrm{T}} \bar{H} (\hat{x} - \bar{x}) - \sum_{k=1}^{n_t} \log P(\bar{x}_k) \tag{8}$$

利用 Cholesky 分解，设 $U^{\mathrm{T}} U = \bar{H}^{\mathrm{T}} \bar{H}$，$U$ 为一个上三角矩阵，U 中的各个元素为 u_{ij} $(i \leqslant j = 1, \cdots, N_t)$，且不失一般性，设 $u_{ii} > 0$，则式(8)变为

$$(\hat{X} - \bar{X})^{\mathrm{T}} \bar{H}^{\mathrm{T}} \bar{H} (X - \bar{X}) - \sum_{k=1}^{N_t} \log p(\bar{x}_k) =$$
$$\sum_{i=1}^{N_t} u_{ii} [\,\bar{x} - \hat{x}_i + \sum_{j=i+1}^{N_t} \frac{u_{ij}}{u_{ii}} (\bar{x}_i - \hat{x}_i)\,]^2 - \sum_{k=1}^{N_t} \log p(\bar{x}_k) \leqslant r^2 \tag{9}$$

注意到上述约束条件不再是以多维球体为出发点，搜索半径 r 由噪声和 x_k 的先验信息的统计特性共同确定。与 LSD-MAP 算法相同，通过各个累加项的约束条件，FP-MAP 算法可以获得符号 $\bar{x}_1, \cdots, \bar{x}_{N_t}$ 的界。首先考虑 $i = N_t$ 的情况：

$$u_{N_t N_t}^2 (\bar{x}_{N_t} - \hat{x}_{N_t})^2 - \log p(\bar{x}_{N_t}) \leqslant r^2 \tag{10}$$

通过式(10)获得 $\bar{x}_{N_t}$ 的界后，FP-MAP 算法向下一层，搜索 $i = N_t - 1$ 层。对于每个满足不等式(10)的符号 x_{N_t} 可以定义为

$$r_{N_t - 1}^2 = r^2 - u_{N_t N_t}^2 (\bar{x}_{N_t} - \hat{x}_{N_t})^2 + \log p(\bar{x}_{N_t}) \tag{11}$$

从而可以获得 $i = N_t - 1$ 时，符号 $x_{N_t - 1}$ 的界。

$$u_{N_t - 1, N_t - 1}^2 [\,\bar{x}_{N_t - 1} - \hat{x}_{N_t - 1} + \frac{u_{N_t - 1, N_t}^2}{u_{N_t, N_t}^2} (\bar{x}_{N_t} - \hat{x}_{N_t})\,] -$$
$$\log p(\bar{x}_{N_t - 1}) \leqslant r_{N_t - 1}^2 \tag{12}$$

同理，从 $i = N_t, N_t - 1, \cdots, 1$ 依次回推，可以获得 x_i $(i = N_t, N_t - 1, \cdots, 1)$ 的取值范围：

$$I_i(x_{i+1}^{N_t}) = [\,A_i(x_{i+1}^{N_t}) \quad B_i(x_{i+1}^{N_t})\,]$$

$$A_i(X_{i+1}^{N_t}) = \lceil \hat{x}_i - \frac{\sqrt{r_i^2 + \log p(\bar{x}_i)}}{u_{ii}} - \sum_{j=i+1}^{N_t} \varepsilon_j \frac{u_{ij}}{u_{ii}} \rceil \tag{13}$$

$$B_i(X_{i+1}^{N_t}) = \lceil \hat{x}_i + \frac{\sqrt{r_i^2 + \log p(\bar{x}_i)}}{u_{ii}} - \sum_{j=i+1}^{N_t} \varepsilon_j \frac{u_{ij}}{u_{ii}} \rceil \tag{14}$$

其中：$\varepsilon_j = \bar{x}_j - \hat{x}_j$。在式(13)(14)中，搜索界的产生可以采用如下的递归等式表示：

$$S_i = \hat{x}_i - \sum_{j=i+1}^{N_t} \varepsilon_j \frac{u_{ij}}{u_{ii}} \tag{15}$$

$$T_{i-1} = r_i^2 + \log p(\bar{x}_i) = T_i - u_{ii}^2 (\bar{x}_i - s_i) + \log p(\bar{x}_i) \tag{16}$$

至此，可以采用 LSD-MAP 算法的搜索步骤进行 FP-MAP 算法的搜索。在采用了软信息迭代以后，FP-MAP 算法在搜索过程中，格点 $\bar{x}_a$ 落在以向量 $\bar{y}$ 为中心，半径为 r 的 N_t 维球体内的概率[9]为

$$P_{\bar{x}_a} = \gamma\left(\frac{r^2 + \sum_{j=1}^{N_t} \log p(\bar{x}_j)}{\sigma^2 + \| \bar{x}_a - \bar{x}_t \|^2}, \frac{N_r - N_t + k}{2} \right) =$$
$$\int_0^{\frac{r^2 + \sum_{j=1}^{N_t} \log p(\bar{x}_j)}{\sigma^2 + \| x_a - x_t \|^2}} \frac{\lambda^{(N_r - N_t + k)/2 - 1}}{\Gamma((N_r - N_t + k)/2} \mathrm{e}^{-\lambda} \mathrm{d}\lambda \tag{17}$$

由于软信息有 $\log P(\bar{x}_j \leqslant 0)$，$j = 1, \cdots, N_t$。因此有

$$r^2 + \sum_{j=1}^{N_t} \log P\,\bar{x}_j \leqslant r^2 \tag{18}$$

所以，对于 LSD-MAP 和 FP-MAP 算法，在采用相同搜索半径 r 的情况下有

$$P_{\bar{x}_a}^{\text{FP-MAP}} \leqslant P_{\bar{x}_a}^{\text{LSD-MAP}} \tag{19}$$

即 FP-MAP 算法在搜索过程中期望访问的格点数将小于或等于 LSD-MAP 算法在搜索过程中期望访问的格点数。从而可以知道，FP-MAP 算法的复杂度要低于或等于 LSD-MAP。

3　仿真结果分析

仿真采用 4×4 MIMO 系统，纠错码采用编码速率 $\eta = 1/2$，记忆长度为 2 的反馈卷积码，编码多项式为 $G_1(D) = 1 + D^2$（前馈），$G_2(D) = 1 + D + D^2$（反馈）。交织采用随机交织，经过交织后的编码比特采用 Gary 映射的方式映射为 16QAM 调制星座并采用 V-BLAST 空时结构，最终通过 4×4 天线发射。假设在接收端有完美的信道信息，信道服从瑞利块衰落分布，信道系数在 $T_s = 4$ 的时间内保持不变。MIMO 检测器分别采用 LSD-MAP 和 FP-MAP 进行软检测。

图 1 为帧长等于 9 216 bit 时，16QAM 调制下 LSD-MAP 和 FP-MAP 算法的迭代性能比较。从图中可以看出，FP-MAP 算法的迭代性能接近或等于 LSD-MAP 算法的迭代性能，是一种比 LSD-MAP 算法简单的迭代算法。

图 2 是帧长为 1 000 bit 时，FP-MAP 和 SIC-MMSE 算法[9]的性能比较。从图中可以看出，FP-MAP 算法的性能要明显优于 SIC-MMSE 算法的性能。FP-MAP 算法　（下转第 753 页）

视频序列的解码速度有一定程度的提升。从空间复杂度角度来讲,优化算法在原有码表的基础上只额外创建了一个四维数组来存储子表的边界值,没有占用其他的额外内存,以极少量的空间最大限度地换取了解码速度的提升。

图 8　Hchua、kroger、fire 视频播放效果

5　结束语

本文介绍了一种基于 H.264/MVC 标准的多视点立体视频熵解码优化算法。该算法利用码字本身的特点,将码表划分成不同的区域,有效减小了码字的查找范围,查表部分时间最大可节省 70% 左右,整体解码时间也有所减少。将优化后的解码器移植到播放器中,实现了对 264 文件的解码与播放功能,对多视点立体视频解码技术有着重要意义。

参考文献:

[1] ALJOSCHA S, CHEN M C. 3DAV exploration of video-based rendering technology in MPEG[J]. IEEE Trans on Circuit and Systems for Video Technology, 2004, 14(3): 348-356.

[2] WIEGARD T, SULLIVAN G J, BJONTEDAARA G B, *et al*. Overview of the H.264/AVC video coding standard[J]. IEEE Trans on CSVT, 2003, 13(7): 560-570.

[3] ITu-T Rec. H.264/ISO/IEC 11496-10, Advanced video coding [S]. 2003.

[4] 刘灿. H.264 解码算法优化及在 ARM 上的移植[D]. 武汉:武汉理工大学, 2009: 1-2.

[5] HASHEMIAN R. Design and hardware implementation of a memory efficient huffman decoding [J]. IEEE Consumer Electronics, 1994, 40(3): 345-352.

[6] KYEONG Y M, CHONG J W. A memory-efficient VLC decoder architecture for MPEG-2 application [C]//Proc of Workshop on IEEE Signal Processing Systems. 2000: 43-49.

[7] ITU-T and ISO/IEC JTC1, ITU-T Recommendation H.264-ISO/IEC 14496-10 AVC, Advanced video coding for generic audiovisual services[S]. 2005.

[8] Joint Video Team (JVT) of ISO/IEC MPEG and ITU-T VCEG, Joint Draft ITU-T Rec. H.264-ISO/IEC 14496-10/Amd. 3 scalable video coding, JVT-X201[S]. 2007.

[9] 毕厚杰. 新一代视频压缩编码标准-H.264/AVC[M]. 北京:人民邮电出版社, 2005: 133-139, 297-300.

[10] LO C C, TSAI S T, SHIEH M D. Reconfigurable architecture for entropy decoding and inverse transform in H.264[J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 2010, 56(3): 1670-1673.

[11] KIM Y J, WANG K Y, LEE S S, *et al*. Implementation of high efficient CAVLC encoder for H.264/AVC[C]//Proc of the 1st International Conference on Pervasive Computing, Signal Processing and Applications. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2010.

[12] 张秀丽, 万忠, 鲍程红. 基于码头分组的 CAVLC 解码算法优化[J]. 电路与系统学报, 2009, 14(3): 126-127.

[13] 龚建锋, 金文光, 季爱明. 基于 H.264 解码中 CAVLC 的优化[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(1): 87-90.

[14] 肖辉, 伍瑞卿, 樊丰. 基于 DM642 的 CAVLC 解码器快速算法与实现[J]. 电视技术, 2009, 33(2): 20-22.

[15] LIU Ma-fei, ZENG Xue-wen, NI Hong. A codeword classification mapping based CAVLC decoding implement algorithm [C]//Proc of the 1st International Conference on Information Science and Engineering. [S. l.]: IEEE Computer Society, 2009.

[16] 贾俊玲, 刘彦辉. 码字前缀分组的 CAVLC 解码优化[J]. 中国新技术新产品, 2010(4): 1-2.

[17] LEE J Y, LEE J J, PARK S. New lookup tables and searching algorithms for fast H.264/AVC CAVLC decoding[J]. IEEE Trans on Circuit and Systems for Video Technology, 2010, 20(7): 1008-1015.

(上接第 740 页)在一次迭代时的性能都要优于 SIC-MMSE 算法四次迭代的性能。

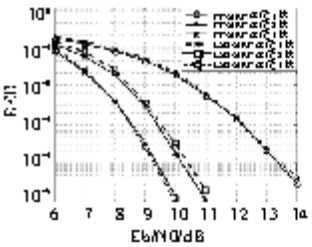

图 1　FP-MAP 和 LSD-MAP 算法性能比较

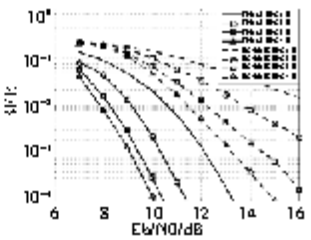

图 2　FP-MAP 和 SIC-MMSE 算法性能比较

4　结束语

本文在球形译码的搜索中引入软信息构成改进的 FP-MAP 算法并给出了具体的迭代步骤。通过仿真分析证明,在同等的条件下,FP-MAP 与 LSD-MAP 算法相比具有较低的复杂度,而其迭代性能仍可以达到 LSD-MAP 算法的水平,并且与 SIC-MMSE 算法相比具有明显的性能增益。

参考文献:

[1] AHMED S, RATNARAJAH T, SELLATHURAI M, *et al*. Iterative receivers for MIMO-OFDM and their convergence behavior[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2009, 58(1): 461-468.

[2] YLIOINAS J, JUNTTI M. Iterative joint detection, decoding, and channel estimation in trubo-coded MIMO-OFDM[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2009, 58(4): 1784-1796.

[3] ABEDISEID W, DAMEN M O. Lattice sequential decoder for coded MIMO channel: performance and complexity analysis [C]//Proc of IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings. 2010: 2248-2252.

[4] HAGENAUER J, KUHN C. The list-sequential (LISS) algorithm and its application [J]. IEEE Trans on Communications, 2007, 55(5): 918-928.

[5] STUDER C, BÖLCSKEI H. Soft-input soft-output single tree-search sphere decoding[J]. IEEE Trans on Communications, 2010, 56(10): 4827-4842.

[6] HOCHWALD B M, BRINK S. Achieving near-capacity on a multiple-antenna channel[J]. IEEE Trans on Communications, 2003, 51(3): 389-399.

[7] NIKITOPOULOS K, ZHANG Dan, LAI I W, *et al*. Complexity-efficient enumeration techniques for soft-input, soft-output sphere decoding [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(4): 312-314.

[8] MYLLYLÄA M, JUNTTIB M, CAVALLARO J R. Implementation aspects of list sphere decoder algorithms for MIMO-OFDM systems[J]. Signal Processing, 2010, 90(10): 2863-2876.

[9] NGUYEN L H, LE-NGOC T, TRAN N H. Iterative receive design with joint channel estimation and synchronization for coded MIMO-OFDM over doubly selective channels[C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conference. 2009: 1-6.