

MIMO-OFDM 系统中基于迭代 MAP 算法的 RLS 信道估计

肖洪 罗汉文 梁永明

(上海交通大学电子工程系 上海 200240)

摘要: 该文提出了一种适用于 MIMO-OFDM 系统的迭代最大后验概率(Iterative-MAP)信道估计算法。接收机利用 MAP 译码算法中的信息位和校验位软信息,经过非线性映射将信息反馈至信道估计模块,采用递归最小二乘(RLS)自适应滤波算法对信道时变状态参数进行跟踪,提高了信道估计的精度。仿真结果表明,该方法与最小二乘(LS)算法相比,估计的均方误差(MSE)和误帧率(FER)性能都有较大改善。

关键词: 信道估计; MIMO-OFDM; 自适应滤波; MAP 译码

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)08-1787-04

RLS Channel Estimation via the Iterative-MAP Algorithm for MIMO-OFDM Systems

Xiao Hong Luo Han-wen Liang Yong-ming

(Department of Electronic Eng., Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200240, China)

Abstract: This paper proposes an iterative Maximum A Posteriori (MAP) probability channel estimation algorithm for MIMO-OFDM systems. The receiver employs the soft systematic bits and soft parity bits of MAP decoding and feeds them back to the channel estimator through nonlinear mapping. To track the time-varying channel, the estimator adopts the Recursive Least Squares (RLS) adaptive filtering algorithm so as to improve the accuracy of the estimation. Computer simulations show that the proposed algorithm can achieve much better performance than the conventional Least Squares (LS) channel estimation in both Mean Square Error (MSE) and Frame Error Rate(FER).

Key words: Channel estimation; MIMO-OFDM; Adaptive filtering; MAP decoding

1 引言

MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)技术的应用是解决日益紧张的无线频谱资源问题的有效方法之一。将多天线技术与正交频分复用相结合,即 MIMO-OFDM 技术,能够有效地减轻严重的符号间干扰(ISI),为无线通信系统在快速变化的信道环境下提供更高的信道容量^[1]。无线接收机需要准确的信道信息进行分集合并、相干检测和译码,因此信道估计的准确性对提高系统的性能十分关键。文献[2]研究了 MIMO-OFDM 系统的信道估计与信号检测迭代联合算法,文献[3]研究了基于时域滤波的迭代信道估计算法,他们通过对信道响应估计值的迭代,改善了信号检测的性能。

由于 Turbo 码^[4]具有很强的纠错能力,采用 Turbo 编码方案的 MIMO-OFDM 系统往往有更好的性能。Valenti 在文献[5]中利用 Turbo 迭代译码软信息,提出了一种信道估计与译码检测联合算法,使系统的误码率性能有了很大的改善。Saux 等人在文献[6]中对每次迭代之前的信道抽头响应用线性回归方法进行处理,将译码软信息在空时信号检测、信道

译码和估计等模块间进行大迭代,进一步提高了估计的精度。本文采用 MAP 准则^[7]进行 Turbo 译码,采用^[5]中提出的循环迭代方法,先用 LS 算法进行初始信道估计,再利用 RLS 自适应滤波算法^[8]对信道时域抽头响应值进行滤波处理,快速跟踪信道信息变化,加快了估计的收敛速度,有很好的估计准确性。特别是在低信噪比情况下(1~4dB),RLS 算法的性能比基于线性回归的迭代算法^[6]有 0.1~0.5dB 的性能增益。

本文的结构安排如下:第 2 节给出了 MIMO-OFDM 的系统结构和信道模型;第 3 节详细介绍了 Turbo 码的 MAP 译码算法在 MIMO-OFDM 系统信道估计中的应用,以及 RLS 自适应滤波算法对估计模块的改进作用;第 4 节给出了计算机仿真结果并对结果进行了简单分析;在第 5 节对全文进行了总结。

2 MIMO-OFDM 系统描述

2.1 系统模型

采用 Turbo 编码的 MIMO-OFDM 系统的发射机和接收机框图分别如图 1 和图 2 所示。系统采用 N_T 根发射天线, N_R 根接收天线, OFDM 调制的子载波数为 N 。 n 时刻的数据块 $d[n, m]$ 经过 Turbo 编码和信道交织后的数据块为

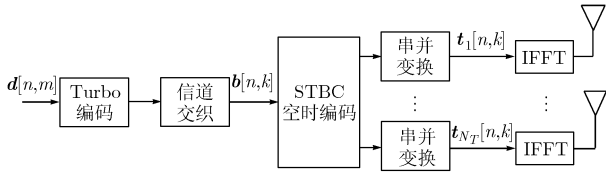


图1 系统的发射机原理

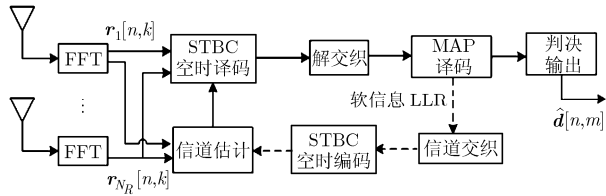


图2 系统的接收机原理

$b[n, k], k=0,1,\dots,N-1$, 进行空时分组编码和串并变换形成了 N_T 个不同的符号块 $t_i[n, k], i=1,2,\dots,N_T$, 然后经过 OFDM 调制后发射。在接收端解调后得到 N_R 个不同信号的叠加, 其中第 j 根接收天线上的信号可以表示为^[9]

$$r_j[n, k] = \sum_{i=1}^{N_T} t_i[n, k] H_{ij}[n, k] + v_j[n, k], j=1,2,\dots, N_R \quad (1)$$

其中 $t_i[n, k]$ 表示 n 时刻发射天线 i 在第 k 个子载波上的发射信号, $H_{ij}[n, k]$ 表示 n 时刻第 k 个子载波对应的从发射天线 i 到接收天线 j 之间的信道频域响应, $v_j[n, k]$ 则表示第 j 根接收天线上的加性复高斯白噪声, 均值为 0, 方差为 σ_n^2 。

2.2 信道模型

无线多径衰落信道的冲激响应可以建模为^[9]

$$h(t, \tau) = \sum_k \gamma_k(t) \delta(\tau - \tau_k) \quad (2)$$

其中 τ_k 表示第 k 条路径的时延, $\gamma_k(t)$ 为广义平稳(WSS)窄带复高斯过程。假设不同路径之间的衰减是相互独立的, 则 n 时刻第 k 个子载波对应的从发射天线 i 到接收天线 j 之间的信道频域响应可以表示为

$$H_{ij}[n, k] = \sum_{l=0}^{L-1} h_{ij}[n, l] e^{-j2\pi kl/N}, k=0,1,\dots,N-1 \quad (3)$$

其中 N 为系统子载波个数, L 为信道冲激响应的长度。为避免多径干扰, 信道抽头长度 L 应满足: $L \leq l_{cp} + 1$, l_{cp} 是每个 OFDM 符号中循环前缀的长度。

3 信道估计

3.1 导频结构

本文采用的导频结构为 Barhumi 等^[10]提出的块状导频符号。发射端信号的帧结构采用在一帧数据前面加入若干个导频符号的方式, 在多天线系统中不同发射天线上, 同一时刻的导频符号是相互正交的。假设接收机不知道信道的任何先验统计信息, 可以在每帧数据区前均放置导频符号, 用于在频域内对信道进行 MMSE 准则的估计, 而不需要任何已知的信道统计信息。为了方便地处理信号, 设置一个 OFDM 符号的不同子载波上的导频符号是相同的, 而不同天线上发

送的导频符号之间互相正交。本文采用的 2 发 2 收 MIMO-OFDM 系统中, 所有插入的导频如图 3 所示。图 3 中, P 为所有天线上的导频序列所组成的导频矩阵, $P = [P_1 \dots P_{N_T}]$, 这里 P_n 是一根天线上的循环导频序列, 周期为 $N_T (P_{n+N_T} = P_n)$, 又满足正交性, 即

$$PP^H = P^H P = N_T I \quad (4)$$

其中 I 为 N_T 阶的单位矩阵, $(\bullet)^H$ 表示矩阵的共轭转置运算。

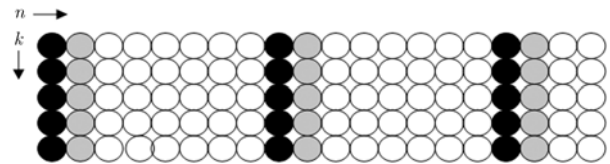


图3 导频结构(●和●分别表示导频符号)

3.2 MAP 迭代译码算法

文献[5]提出了在多径衰落信道环境中利用 Turbo 译码模块软信息的迭代判决反馈信道估计方法。这里将其扩展应用到 MIMO-OFDM 系统中。图 2 所示的空时编码 OFDM 系统接收机框图主要由 3 个模块组成: 空时信号检测模块、信道估计模块和 MAP 译码模块。为了将信道估计和译码联合考虑, 接收机在每次迭代过程中对信道估计值也进行迭代, 在 3 个模块之间传递更加可靠的软信息, 从而提高信道估计的精度。

空时信号检测模块利用接收信号和初始信道估计值进行信号检测, 其中初始信道估计值由 LS 算法得到。译码模块采用改进的 Log-MAP 算法^[7], 译码后同时得到信息比特和校验位比特的软信息。将软信息按照 Turbo 编码器的结构进行重构、信道交织和空时编码, 然后反馈到信道估计模块, 更新上一次的信道估计值。通过迭代过程, 信道编码的冗余信息在各模块之间得到有效的传递, 增强了系统的纠错能力, 从而提高估计的准确性。同时, 由于算法利用了 Log-MAP 译码的校验位信息, 减小了接收端重构时造成的误差传播, 使得信道估计模块利用正确译码信息的概率增加。

Log-MAP 算法需要计算编码比特的对数似然比(Log-Likelihood Ratios, LLR)。经过 q 次迭代后, Turbo 译码器输出的码字符号的对数似然比可以表示为^[7]

$$L^{(q)}(d_k) = L_c z_k + L_e^{(q)}(d_k) + \log \left(\frac{\sum_{s^+} \alpha_{k-1}(s) \gamma_k(s, s') \beta_k(s')}{\sum_{s^-} \alpha_{k-1}(s) \gamma_k(s, s') \beta_k(s')} \right) \quad (5)$$

式中 $\alpha_{k-1}(s)$ 为达到状态 s 的前向递推概率, $\beta_k(s')$ 为到达状态 s' 的后向递推概率, $\gamma_k(s, s')$ 是状态 s 到 s' 之间的路径度量, s^+ 与 s^- 分别表示 $d_k=1$ 和 $d_k=-1$ 时的状态。 L_c 表示信道的可靠度, z_k 为译码器的输入符号, $L_e^{(q)}(d_k)$ 代表的是前一个译码器提供的关于码字比特 d_k 的先验信息。

在得到了包括信息位和校验位在内的编码比特的对数

似然比后, 对其进行非线性软判决, 得到码字比特软信息

$$d_k^{(q)} = \tanh(L^{(q)}(d_k)/2) \quad (6)$$

将得到的比特软信息经过信道交织、调制映射和空时编码, 然后反馈给信道估计模块, 用于空时信号检测, 如图 2 虚线部分所示。经过若干次这样的迭代过程, 对 Turbo 译码信息比特软信息进行判决得到信息比特, 同时将更新后的信道响应值用于下一个符号的信道估计, 这就完成了整个 MAP 译码迭代信道估计过程。

3.3 自适应信道跟踪与估计

信道估计模块采用的 RLS 时域滤波方法, 可以分为 3 步来实现, 如图 4 所示。第 1 步在频域求出信道的传输函数矩阵, 经过 IFFT 得到时域冲激响应值。第 2 步为自适应滤波过程, 采用 RLS 算法对信道进行跟踪和估计。第 3 步则通过 FFT 得到频域的信道传输函数矩阵。

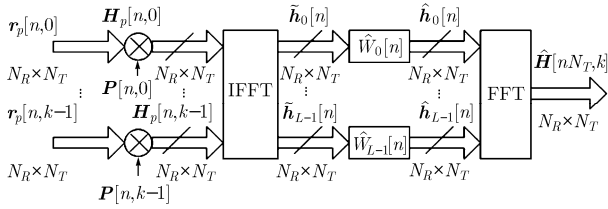


图 4 RLS 信道估计模块

接收天线从信号中提取导频符号 \mathbf{r}_p , 先忽略噪声的影响, 由 LS 准则得到导频位置的频域信道系数矩阵

$$\mathbf{H}_p[n, k] = \mathbf{r}_p[n, k] \mathbf{P}[n, k] / N_T \quad (7)$$

然后经过 IFFT 得到时域冲激响应

$$\tilde{\mathbf{h}}_l[n] = \frac{N_T}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{H}_p[n, k] e^{j2\pi kl/N}, \quad l = 0, 1, \dots, L-1 \quad (8)$$

因为基于 MMSE 准则的维纳滤波需要信道和噪声的二阶统计量信息, 并且, 如果这些统计量发生变化, 信道估计器就需要重新设计。为了减小计算复杂度和增加系统的适用性, 本文提出采用 RLS 算法^[8]的自适应滤波器作为信道估计模块的核心, 将 $\tilde{\mathbf{h}}_l[n]$ 经过抽头系数为 $\widehat{\mathbf{W}}_l[n]$ 的时变自适应滤波器滤波, 得到时域响应矩阵 $\hat{\mathbf{h}}_l[n]$ 。为表示方便, 以下省略下标 l , 得到

$$\hat{\mathbf{h}}[n] = \widehat{\mathbf{W}}^H[n] \tilde{\mathbf{h}}[n] \quad (9)$$

其估计误差为

$$\mathbf{E}[n] = \tilde{\mathbf{h}}[n] - \widehat{\mathbf{W}}^H[n-1] \tilde{\mathbf{h}}[n] \quad (10)$$

而抽头系数由式(11)更新

$$\widehat{\mathbf{W}}[n] = \widehat{\mathbf{W}}[n-1] + \mathbf{k}[n] \mathbf{E}^*[n] \quad (11)$$

$$\mathbf{k}[n] = \frac{\mathbf{Q}[n-1] \tilde{\mathbf{h}}[n]}{\lambda + \tilde{\mathbf{h}}^H[n] \mathbf{Q}[n-1] \tilde{\mathbf{h}}[n]} \quad (12)$$

其中 $(\cdot)^*$ 表示共轭运算; λ 称为遗忘因子, 其取值为接近 1 而小于 1 的正常数; $\mathbf{k}[n]$ 称为时变增益向量; 滤波器权系数的初始化取值为 $\widehat{\mathbf{W}}[0] = \mathbf{0}$; $\mathbf{Q}[n]$ 为逆相关矩阵, 由下式计

算得到

$$\begin{cases} \mathbf{Q}[0] = \delta^{-1} \mathbf{I} \\ \mathbf{Q}[n] = \lambda^{-1} \mathbf{Q}[n-1] - \lambda^{-1} \mathbf{k}[n] \tilde{\mathbf{h}}^H[n] \mathbf{Q}[n-1] \end{cases} \quad (13)$$

式中 δ 是正则化参数, 取值与信噪比有关, 高信噪比时取较小的正常数, 而低信噪比时取较大的正常数; \mathbf{I} 为 L 阶单位矩阵。

得到时域响应矩阵 $\hat{\mathbf{h}}_l[n]$ 之后, 再经过 FFT 变换可以得到频域信道传输函数估计矩阵如下:

$$\widehat{\mathbf{H}}[nN_T, k] = \frac{1}{\sqrt{N_T}} \sum_{l=0}^{L-1} \hat{\mathbf{h}}_l[n] e^{-j2\pi kl/N} \quad (14)$$

$\widehat{\mathbf{H}}[nN_T, k]$ 是导频处的信道频域响应。假设信道在 N_T 个符号期间是慢变的, 这样可以通过简单线性内插方法^[9]来恢复所有时刻的信道响应 $\widehat{\mathbf{H}}[n, k]$ 。设实际信道响应矩阵为 $\mathbf{H}[n, k]$, 则信道估计的均方误差为^[9]

$$\text{MSE} = \frac{1}{N_T N_R} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_R} E \left\{ \left\| \mathbf{H}_{ij}[n, k] - \widehat{\mathbf{H}}_{ij}[n, k] \right\|^2 \right\} \quad (15)$$

4 仿真结果分析

4.1 仿真参数

基于以上的分析和描述, 本文将这种基于迭代 MAP 译码算法的 RLS 信道估计算法应用于 MIMO-OFDM 仿真平台。采用 2 发 2 收的 MIMO-OFDM 系统, 空时编码用 Alamouti 方案, 导频结构如图 3 所示。信道为 COST207 TU 模型, 信号带宽 20 MHz, 载波频率 3.5 GHz, 调制方式为 QPSK 映射, 子载波数为 128, 循环前缀长度 $l_{cp} = 16$, 移动台速度为 30 km/h 的车载环境。Turbo 编码采用 PCCC (Parallel Concatenated Convolution Code) 方案, 数据帧长 2560 bit, 使用两个 8 状态 RSC 编码器和一个 Turbo 码随机内交织器, 码率为 1/2。RLS 自适应滤波模块中, 正则化参数 $\delta = 0.1$, 遗忘因子 $\lambda = 0.9$ 。在接收端, 译码采用 Log-MAP 算法。下面的仿真曲线都是在产生 100 个随机信道的基础上做算术平均得到的结果。

4.2 仿真结果

按照上述系统参数对系统的信道估计性能进行仿真。图 5 和图 6 分别为采用 RLS 算法和文献[6]中的线性回归迭代算法(下称 LR)时, 不同信噪比条件下的误帧率(FER)性能比较。从图 5, 图 6 中可以看出, 随着迭代次数的增加, 系统的 FER 随之减小。在 FER=0.01 时, 经过 3 次迭代, RLS 算法和 LR 算法的性能都有 3dB 的增益。图 7 表明, 在相同的迭代次数下, RLS 算法与 LR 算法的 FER 性能十分接近。同时, RLS 算法由于收敛速度快, 在 FER 较低时, 性能优于 LR 算法。但是当迭代次数超过 3 次以后, 系统的 FER 性能的改善变得有限, 原因在于随着迭代次数的增加, MAP 译码器反馈给信道估计模块的有用信息变少了。图 8 比较了上述两种算法和 LS 算法的均方误差(MSE)性能, 信道估计的 MSE 的大小随着迭代次数的增加而减小, 这跟 FER 曲线

是一致的。由于 RLS 收敛较快, 在低信噪比情况下, 它的 MSE 性能要优于 LR 算法。

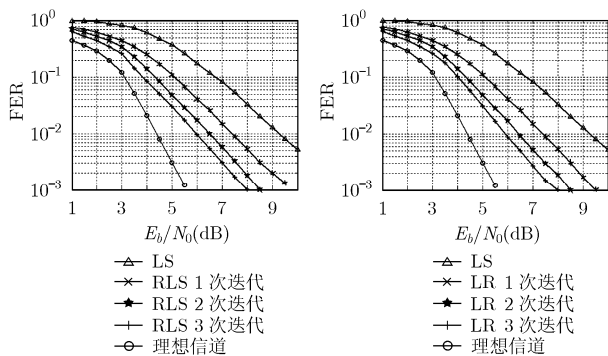


图5 RLS 算法的迭代估计 FER 性能

图6 LR 算法的迭代估计 FER 性能

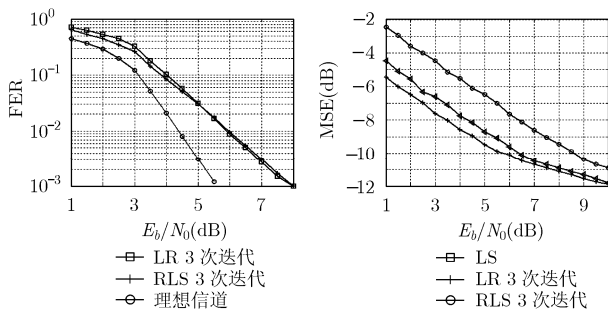


图7 RLS/LR 算法性能比较

图8 MSE 性能

4.3 算法复杂度分析

系统由于采用了迭代算法, 必然造成计算复杂度的增加。本系统的复杂度主要是由 Turbo 译码模块和 RLS 自适应滤波模块带来的。在迭代译码模块, Turbo 译码时采用了性能最优的 Log-MAP 译码算法, 对于移位寄存器长度为 M 的分量卷积码, 其总运算量为 16×2^M 次加法, 5×2^M 次求最大值运算和 5×2^M 次查表运算^[4]。在 RLS 滤波模块, 每次迭代需要 $2 \times N_r \times N_t$ 次的 FFT/IFFT 运算以及 N^2 (N 为滤波器长度) 次的乘法运算^[8]。

5 结束语

本文研究采用 Turbo 编码的 MIMO-OFDM 系统在多径衰落条件下的信道估计问题, 提出了一种基于迭代 MAP 译码原理的 RLS 自适应信道估计算法。本文提出的信道估计方法主要有以下特点: (1) 逐符号实现了信道跟踪, 克服了 LS 算法估计偏差较大的缺点。(2) 通过 MAP 译码产生的软信息反馈和迭代过程, 使得系统中各部分的信息量得到有效的保护和传递, 循环迭代过程提高了系统的 FER 和 MSE 性能。(3) RLS 算法不需要任何先验的信道统计信息, 并且收敛较快, 是低信噪比情况下进行信道估计的理想选择。仿真结果表明, 信噪比在 6 dB 以内时, RLS 算法的 MSE 性能

比 LR 算法有近 1dB 的增益。

参考文献

- [1] Agrawal D, Tarokh V, and Naguib A, *et al.* Space-time coded OFDM for high data-rate wireless communication over wideband. In Proc. IEEE VTC, Ottawa, Ont., Canada, May 1998, Vol.3: 2232-2236.
- [2] Song Bowei, Zhang Wenzhun, and Gui Lin. Iterative joint channel estimation and signal detection in MIMO-OFDM systems. Proceedings. 2005 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 23-26 Sept., 2005, Vol.1: 39-43.
- [3] Chen Jiming and Li Shaoqian. Iterative channel estimation for MIMO-OFDM systems. Proceedings. 2005 International Conference on Communications, Circuits and Systems, 27-30 May, 2005, Vol.1:180-184.
- [4] Berrou C, Glavieux A, and Thitimajshima P. Near Shannon limit error correcting coding and decoding: Turbo codes (1)[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications[C]. Geneva, Switzerland, 1993: 1064-1070.
- [5] Valenti M C and Woerner B D. Iterative channel estimation and decoding of pilot symbol assisted Turbo codes over flat-fading channels. *IEEE J. on SAC*, 2001, 19(9): 1697-1705.
- [6] Saux B L and Helard M. Iterative channel estimation based on linear regression for a MIMO-OFDM system. IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, Montréal, Canada, 19-21 June, 2006: 356-361.
- [7] Bahl L R, Cocke J, and Jelinek E, *et al.* Optimum decoding of linear codes for minimizing symbol error rate. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1974, 20(2): 284-287.
- [8] Haykin S. Adaptive Filter Theory. 4th ed., New Jersey, USA: Prentice-Hall, 2002, chap. 9.
- [9] Li Y. Simplified channel estimation for OFDM systems with multiple transmit antennas[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2002, 1(1): 67-75.
- [10] Barhumi I and Leus G. Optimal training design for MIMO-OFDM systems in mobile wireless channels[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2003, 51(6): 1615-1624.

肖洪: 男, 1982年生, 硕士生, 研究方向为 OFDM 系统中的自适应信道估计。

罗汉文: 男, 1950年生, 教授, 研究方向为移动通信、通信信号处理。

梁永明: 男, 1974年生, 博士生, 研究方向为 MIMO-OFDM 系统中的信道估计、MIMO 均衡与检测。