

MIMO-OFDM 系统中稀疏信道估计算法研究*

朱行涛, 刘郁林, 赵翔, 徐舜

(重庆通信学院, 重庆 400035)

摘要: 针对多输入多输出正交频分复用系统, 利用信道冲激响应的稀疏特性, 提出 1 种新的 MIMO-OFDM 信道估计算法, 简称为 MIMO-MP 算法. 首先利用匹配追踪思想确定出非零抽头系数的位置, 然后再采用最小二乘算法完成对非零系数值的 2 次估计, 从而通过减少信道估计参数的个数降低算法复杂度. 该算法具有较好的性能, 但在剩余向量更新上还不是很精确, 通过改进剩余向量的更新方式, 得到另一种性能更优的算法简称为 MIMO-MMP 算法. 仿真结果验证了算法的有效性.

关键词: 正交频分复用; 多输入多输出(MIMO); 稀疏信道; 匹配追踪算法

中图分类号: TN 911.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-7971(2007)06-0574-05

由于正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)系统具有频带利用率高、可有效抵抗多径干扰和窄带干扰等很多优点^[1], 近年来已引起人们的广泛关注. 在 OFDM 接收机设计中, 往往需要已知信道状态信息(channel state information, CSI), 因此, 对信道参数进行估计具有重要的意义.

近年来, 研究人员对 OFDM 信道估计问题进行了大量研究, 提出了许多估计方法. 文献[2, 3]等提出几种关于 OFDM 系统的信道估计算法, 取得较好的估计效果, 但它们都是针对单输入单输出(single input single output, SISO)正交频分复用系统, 简记为 SISO-OFDM 系统. 随着人们对无线数据和多媒体业务的需求, 由于多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)技术能有效地提高系统的容量^[4], 在无线频谱资源紧缺的条件下, MIMO 技术和 OFDM 技术的结合即 MIMO-OFDM 系统无疑是提高频谱利用率和数据传输速率的有效方法之一. 针对 MIMO-OFDM 系统, 文献[5, 6]分别提出了 2 种不同的信道估计方法, 由于没有利用信道的先验信息(如稀疏性等), 算法的复杂度高, 而且性能差. 因此, 为降低算法复杂度, 获得性能稳健的算法, 有必要利用信道的稀疏性对信道进行估计. 由于稀疏信道估计问题可看成是稀疏性表示问题, 而在稀疏性表示问题中, 匹配追踪算法(matching pursuit, MP)^[7]是 1 种性能优越的算法, 于是, 针对 MIMO-OFDM 稀疏信道, 本文提出一种基于匹配追踪的 MIMO-OFDM 稀疏信道估计算法简称为 MIMO-MP 算法. 该算法的主要思想是利用参考矩阵的列向量去拟合观测向量, 得到与观测向量最相关的几个列向量, 然后利用参考矩阵列向量与信道抽头的对应关系, 探测出非零值抽头的位置, 最后再利用最小二乘算法来估计探测出的非零抽头系数值. 该算法具有较好的性能, 但在剩余向量更新上还不是很精确, 通过改进剩余向量的更新方式, 文章得到另一种性能更优的 MIMO-MMP 算法.

针对提出的新算法, 文章进行了仿真. 仿真结果表明: 在低信噪比(0~10 dB)的情况下, MIMO-MP 算法和 MIMO-MMP 算法具有相同的归一化均方误差(NMSE)性能, 比 MIMO-LS 算法的 NMSE 性能优约 12 dB; 随着信噪比的增加(15~50 dB), MIMO-LS 算法的 NMSE 性能仍远差于这 2 种新算法, 而 MIMO-MMP 算法的 NMSE 性能逐渐优于 MIMO-MP 算法, 在时, 这种 NMSE 性能差达到 6.5 dB. 虽然 MIMO-MMP 算法的复杂度比 MIMO-MP 算法的高, 但在导频数较少的情况下, 这种差异不是太大, 可以忽略. 因此总的来说, MIMO-MMP 算法的性能更优.

* 收稿日期: 2007-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60672157; 60672158).

作者简介: 朱行涛(1982-), 男, 湖北人, 硕士生, 主要从事盲均衡和自适应信号处理方面的研究.

1 MIMO- OFDM 系统模型

图 1 为 1 个有 N_t 个发射天线和 N_r 个接收天线的 MIMO- OFDM 系统发射和接收框图. 在传输过程中, 发射端传输的数据被分成 N_t 个不同的符号块 $X_i, i = 1, 2, \dots, N_t$, 分别对 N_t 这个符号块进行 N 点的 IFFT, 并插入长度为 N_{cp} 的循环前缀(N_{cp} 大于最大的多径延迟), 然后通过 N_t 个发射天线进行传输. 通常信道的相关时间要远大于 OFDM 的符号周期 T , 在一个完整的 OFDM 符号里, 信道被认为是时不变的, 只是在不同的 OFDM 符号里, 信道才是时变的. 文章的研究是建立在理想载波和时间同步的假设之上的, 在接收端, 被解调后的 OFDM 符号可以写成如下的矩阵形式

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{diag}\{H_{11}\} & \dots & \text{diag}\{H_{1N_t}\} \\ \vdots & & \vdots \\ \text{diag}\{H_{N_r 1}\} & \dots & \text{diag}\{H_{N_r N_t}\} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} + (I_{N_r} \otimes W) \Xi, \tag{1}$$

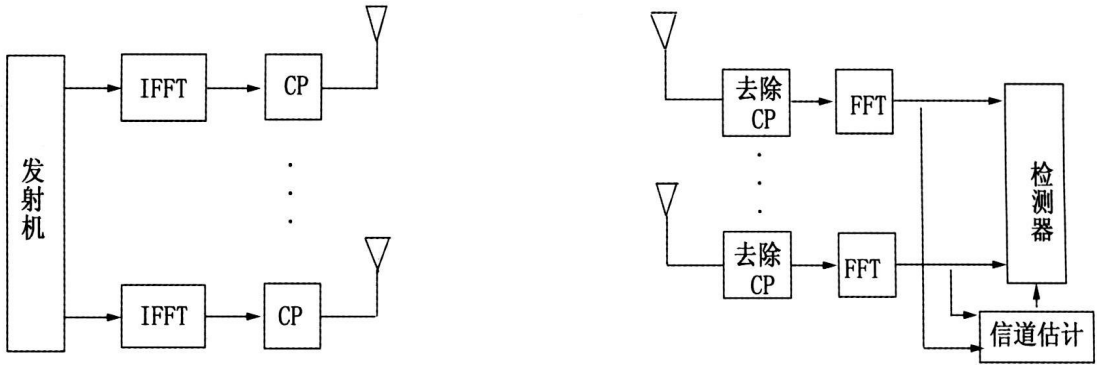


图 1 MIMO- OFDM 发射和接收框图

Fig.1 Chart of transmit and receive for MIMO- OFDM system

其中 \otimes 表示对矩阵的 Kronecker 积. 经过变形, 也可以写成如下形式

$$R = I_{N_r} \otimes [\text{diag}\{X_1\} \dots \text{diag}\{X_{N_t}\}] \cdot \begin{bmatrix} H_{11} \\ \vdots \\ H_{N_r N_t} \end{bmatrix} + (I_{N_r} \otimes W) \Xi = \\ I_{N_r} \otimes [\text{diag}\{X_1\} W_L \dots \text{diag}\{X_{N_t}\} W_L] \cdot \begin{bmatrix} h_{11} \\ \vdots \\ h_{N_r N_t} \end{bmatrix} + (I_{N_r} \otimes W) \Xi. \tag{2}$$

在这里, H_{j_i} 表示由第 i 个接收天线和第 j 个接收天线间的信道频域响应组成的 $N \times 1$ 复向量, h_{j_i} 是其对应的时域冲击响应向量, W 是 1 个 $N \times N$ 的快速傅立叶变换矩阵, W_L 表示 W 的前 L 列, 其中 L 是信道的最大长度. I_{N_r} 是 1 个 $N_r \times N_r$ 的单位阵, Ξ 是 1 个零均值的、独立同分布的 $NN_r \times 1$ 的高斯向量即

$$E\{\Xi \Xi^H\} = \sigma_n^2 I_{KN_r}, \tag{3}$$

式中, $[\dots]^H$ 表示矩阵或向量进行共轭转置, σ_n^2 是加性噪声的方差.

在高速无线通信、水底声音通信^[8] 和高清晰数字电视(high- definition television, HDTV)^[9] 中, 传输信道通常为稀疏多径衰落信道, 在一个 OFDM 符号里, 设信道是时不变的, 因此 $h_{j_i}(\tau)$ 可写成如下形式

$$h_{j_i}(\tau) = \sum_{k=0}^{d-1} a_{j_i}^k \delta(\tau - \tau_i^k T_s), \tag{4}$$

其中 τ_i^k 为信道延迟, $a_{j_i}^k$ 是 1 个功率延迟剖面为指数形式的零均值的复高斯随机变量, T_s 是 OFDM 系统的采样间隔, d 表示信道的多径数.

2 信道估计

在 OFDM 系统中,一般都是通过传输导频序列来对信道进行估计. 设 $\eta = \{k_1, k_2, \dots, k_p\}$ 表示 p 个导频插入位置的集合, 并且假设从不同发射天线发出的导频符号位置是相同的. 于是由(2)可得

$$\check{R} = \Psi h + \check{\Xi}, \quad (5)$$

其中 $\check{R} = [\check{R}_1^T \dots \check{R}_N^T]^T$, $h = [h_{11}^T \dots h_{Np}^T]^T$, $\Phi = [\text{diag}\{Pt_1\} W_{\eta, L} \dots \text{diag}\{Pt_N\} W_{\eta, L}]$, $\Psi = I_{N_r} \otimes \Phi$, \check{R}_i 和 R_{ij} 分别表示观测信号向量和导频符号向量, $[\dots]^T$ 表示对矩阵或向量进行转置, $W_{\eta, L}$ 表示由 W_L 在导频位置对应的行所组成的矩阵. $\check{\Xi}$ 为 $-N_r p \times 1$ 的高斯噪声向量, 它和 h 是相互独立的.

2.1 最小二乘算法 利用常见的最小二乘(least square, LS)算法去求解(5)式所描述的矩阵方程, 可以对信道冲激响应 h 进行估计, 其形式如下^[10]

$$h_{LS} = \Psi^+ \check{R} = (\Psi^H \Psi)^{-1} \Psi^H \check{R}, \quad (6)$$

其中, $[\dots]^+$ 表示广义逆, $(\dots)^{-1}$ 表示对方阵求逆. 相对应的信道冲激频域响应的 LS 估计形式为

$$H_{LS} = (I_{N_r p} \otimes W_L) h_{LS} = (I_{N_r p} \otimes W_L) \cdot (\Psi^H \Psi)^{-1} \Psi^H \check{R}. \quad (7)$$

注意到在对信道进行估计时, 涉及到对矩阵 Ψ 求广义逆, 其必须满足 $P \geq N_r L$, 不然由(6)和(7)所得到的二乘解是病态的.

2.2 MIMO- MP 算法 在式(5)所描述的 MIMO- OFDM 稀疏信道模型中, 令 $b = \check{R}$, $A = \Psi = [a_1, a_2, \dots, a_n]$, 则

$$b = Ah + \check{\Xi}. \quad (8)$$

利用信道的稀疏性, 本文提出一种基于匹配追踪思想的新的 MIMO- OFDM 信道估计算法(简称为 MIMO- MP 算法).

该算法是利用矩阵 A 中的少数几个列向量的线性组合去近似拟合观测向量 b , 它首先在矩阵 A 中找出与观测向量 b 最相匹配的列向量, 然后更新观测向量 b , 直到满足一定的条件迭代终止. 探测出非零抽头系数的位置后, 为得到较好的 NMSE 性能, 再采用最小二乘算法完成对非零系数值的二次估计.

令 $P_{a_l} = a_l a_l^H / \|a_l\|^2$ (其中 $\|\dots\|$ 表示求 norm-2 范数) 表示投影向量, 第 p 次迭代时, 选取与 b_{p-1} 最相匹配的参考向量列数 k_p 的过程如下

$$k_p = \arg \max_l \|P_{a_l} b_{p-1}\| = \arg \max_l \frac{|a_l^H b_{p-1}|^2}{\|a_l\|^2}, \quad l = 1, 2, \dots, N; l \notin I_{p-1}, \quad (9)$$

其中 $|\dots|$ 表示求绝对值, I_{p-1} 为 k_1, k_2, \dots, k_{p-1} 组成的集合 $\{k_1, k_2, \dots, k_{p-1}\}$. 然后对剩余向量 b_{p-1} 进行更新

$$b_p = P_{a_{k_p}}^\perp b_{p-1} = b_{p-1} - P_{a_{k_p}} b_{p-1} = b_{p-1} - \frac{(a_{k_p}^H b_{p-1}) a_{k_p}}{\|a_{k_p}\|^2}. \quad (10)$$

令 $\Phi = [a_{k_1}, a_{k_2}, \dots, a_{k_p}]$, $\mathbf{h}_r = [h_{k_1}, h_{k_2}, \dots, h_{k_p}]^T$, 二次估计问题可表示为如下形式

$$\mathbf{h}_r = \arg \min_{\mathbf{h}_r} \{\|b - \Phi \mathbf{h}_r\|^2\}. \quad (11)$$

2.3 MIMO- MMP 算法 MIMO- OFDM 稀疏信道估计的匹配追踪算法是利用矩阵 A 中的少数几个列向量的线性组合去近似观测向量 b , 它具有良好的性能和较低的复杂度, 但对剩余向量 b_p 的更新不是很精确, 通过改进剩余向量的更新方式, 文章得到另一种性能更优的改进匹配追踪算法(modify matching pursuit, MMP) 简称为 MIMO- MMP 算法.

MIMO- MMP 算法对剩余向量 b_p 的更新过程如下

$$b_p = P_{C_p}^\perp b_{p-1} = b_{p-1} - P_{C_p} b_{p-1}, \quad (12)$$

其中, C_p 表示由前 p 次迭代所选取的参考矩阵的列所组成的矩阵空间, P_{C_p} 为投影矩阵, 其满足如下关系式

$$P_{C_p} = P_{C_{p-1}} + q_p q_p^H, \tag{13}$$

其中 $q_p = \tilde{a}_{k_p}^p / \|\tilde{a}_{k_p}^p\|$, $\tilde{a}_{k_p}^l = \tilde{a}_{k_p}^{l-1} - (q_{l-1}^H \tilde{a}_{k_p}^{l-1}) q_{l-1}$, $l = 1, 2, \dots, p$.

把(13) 式代入(12) 中得到剩余向量 b_{p-1} 的更新公式为

$$b_p = b_{p-1} - (q_p^H b_{p-1}) q_p, \tag{14}$$

初始化时, $\tilde{a}_{k_p}^0 = a_{k_p}$, $q_0 = 0$.

算法的其它迭代过程与 MIMO- MP 算法类似, 由于改进后的算法在剩余向量更新方式上更精确, 因此可以获得更好的 NMSE 性能.

3 仿真及结果

在仿真中, 设每个子信道 (h_{ji}) 的多径数为 10, 信道长度 $L = 30$, $N = 512$, 传输的频域信号 $X_i (i = 1, 2, \dots, N_t)$ 为独立同分布的 16- QAM 信号, 导频数目 $P = 64$, 为简单起见, 假设导频序列是从第 1 个数据开始连续插入的. 这里只对 2×2 系统 (2 输入 2 输出) 进行了仿真.

文章分别利用 MIMO- LS, MIMO- MP 和 MIMO- MMP 3 种算法去估计 MIMO- OFDM 稀疏信道, 通过比较归一化均方误差 (NMSE) 来衡量算法的性能, NMSE 定义如下^[5]

$$NMSE = \frac{E \left[\sum_k |H(k) - \hat{H}(k)|^2 \right]}{E \left[\sum_k |H(k)|^2 \right]}. \tag{15}$$

在不同的信噪比 SNR 下, 对各种算法的归一化均方误差 NMSE 进行了仿真, 图 2 为其曲线图. 从图 2 中可看出, 在低信噪比的情况下 (0~ 10 dB), MIMO- MP 算法的 NMSE 性能与 MIMO- MMP 算法的相当, 比 MIMO- LS 算法的 NMSE 性能优约 12 dB. 随着信噪比的增加, 在 SNR= 15 dB 后, MIMO- MMP 算法的 NMSE 性能逐渐优于 MIMO- MP 算法, 在 SNR= 35 dB, 这种性能差异达到 4 dB. 虽然 MIMO- LS 算法的 NMSE 也随着信噪比的增加而减少, 但它的 NMSE 性能要远差于这两种算法, 这主要是因为 MIMO- LS 算法没有利用信道稀疏这个先验条件.

最后把各种信道估计值用于信道均衡器的设计中, 图 3 为在不同信噪比情况下的误符号率曲线图. 从图 3 中可看出, 在低信噪比的情况下 (0~ 10 dB), 由 MIMO- MP 算法与 MIMO- MMP 算法所得误符

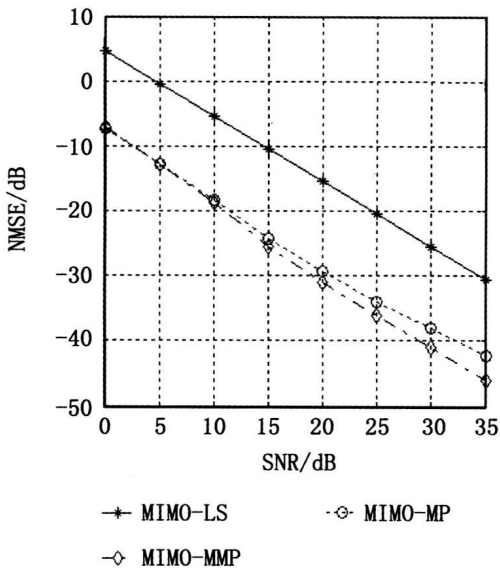


图 2 系统的 NMSE

Fig. 2 NMSE versus SNR for system

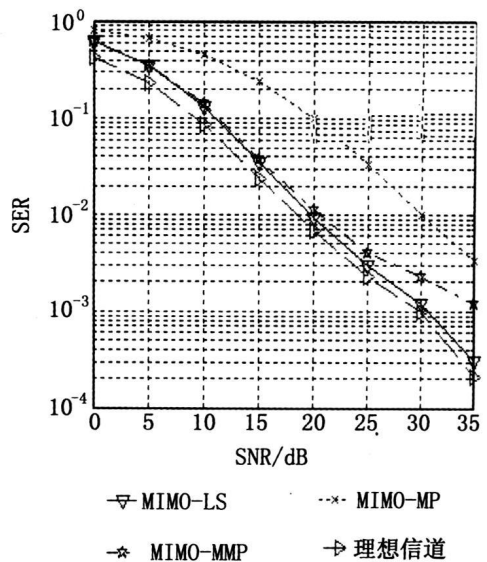


图 3 系统的误符号率 SER

Fig. 3 SER versus SNR for system

号率(SER)相当,随着信噪比的增加(10~35 dB),由MIMO-MMP算法所得误符号率逐渐小于MIMO-MP算法,并越来越接近由理想信道所得的误符号率,而由MIMO-LS算法所得误符号率性能一直是最差的。

4 结 论

针对多输入多输出正交频分复用系统,利用信道冲激响应的稀疏性,提出一种新的MIMO-OFDM稀疏信道估计算法(MIMO-MP算法),该算法分2步完成:首先探测出非零抽头系数的位置,然后再采用最小二乘算法完成对非零系数值的二次估计,通过减少信道估计参数的个数降低算法复杂度,获得了较好的性能,但由于其在剩余向量更新上还不是很精确,通过改进剩余向量的更新方式,得到另一种性能更优的MIMO-MMP算法.仿真结果验证了以上结论。

参考文献:

- [1] 佟学俭,罗涛.OFDM移动通信技术原理与运用[M].北京:人民邮电出版社,2003.123-133.
- [2] MINN H, BHARGAVA V K. An investigation into time domain approach for OFDM channel estimation[J]. IEEE Trans Broadcasting, 2000, 46(4): 240-248.
- [3] RAGHAVENDRA M R, GIRIDHAR K. Improving channel estimation in OFDM systems for sparse multipath channels[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(1): 52-55.
- [4] FOSCHINI G J, GANS M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Personal Communications, 1998, 6: 311-335.
- [5] LARSSON E G, LI J. Preamble design for multiple antenna ofdm based wlans with null subcarriers[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2001, 8(11): 285-288.
- [6] LI Y. Simplified channel estimation for ofdm systems with multiple transmit antennas[J]. IEEE Trans on Wireless Commun, 2002, 1(1): 67-75.
- [7] COTTER S F, RAO B D. Sparse channel estimation via matching pursuit with application to equalization[J]. IEEE Trans on Commun, 2002, 50(3): 374-377.
- [8] CARBONELLI C, VEDANTAM S, MITRA U. Sparse channel estimation with zero tap detection[C]. Proceedings ICC 04, (Paris), 2003, 20-24.
- [9] FEVRIER I J, GELF S B, FITZ M P. Reduced complexity decision feedback equalization for multipath channel with large delay spread[J]. IEEE Trans on Comm, 1999, 927-937.
- [10] KAY S. Fundamental of statistical signal processing: estimation theory[M]. Englewood Cliffs NJ: Prentice Hall, 1993.

Study on sparse channel estimation algorithm for MIMO-OFDM systems

ZHU Xing-tao, LIU Yir-lin, ZHAO Xiang, XU-Shun
(Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China)

Abstract A novel MIMO-OFDM channel estimation algorithm is proposed by exploiting the sparsity property of channel impulse response. At first, the matching pursuit idea is used to detect the position of the nonzero tap coefficients, then the least square algorithm is utilized to estimate the exact value of the nonzero coefficients, so as to reduce the computational complexity of the algorithm by decreasing the numbers of the channel parameters being estimated. This algorithm has good performance, but the update of the residue vector is not exact, another algorithm called MIMO-MMP is acquired by modifying the mode of the residue vector update, MIMO-MMP algorithm has better performance. Simulation results demonstrate the validity of the algorithm.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); multiple input multiple output (MIMO); sparse channel; matching pursuit algorithm