

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.10.007

引用格式:龙恩,王慧. OFDM 系统中基于弱选择 ROMP 算法的稀疏信道估计[J]. 电讯技术,2014,54(10):1349-1353. [LONG Ken, WANG Hui. OFDM Sparse Channel Estimation Based on Weak Selected Regularized Orthogonal Matching Pursuit Algorithm[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(10):1349-1353.]

OFDM 系统中基于弱选择 ROMP 算法的稀疏信道估计*

龙 恩**,王 慧

(重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室,重庆 400065)

摘 要:为了解决实际 OFDM 通信系统中信道稀疏度未知的不足,提出将弱选择正则化正交匹配追踪算法用于估计稀疏信道。算法在不知晓信道稀疏度的情况下,对不同迭代残差与测量矩阵中原子的相关系数进行判定后,根据原子的弱选择准则灵活地确定出表示信道冲激响应的原子候选集,进而利用正则化原则从候选集中挑选出表示信道冲激响应的最优原子组,逐步实现精确重建。仿真结果和理论分析表明:与正则化正交匹配追踪算法相比,相同条件下改进算法可以获得更低的均方误差和误比特率;另外,算法无需将信道稀疏度作为先验信息,实用性更强。

关键词:OFDM 系统;压缩感知;稀疏信道估计;弱选择;正则化正交匹配追踪

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)10-1349-05

OFDM Sparse Channel Estimation Based on Weak Selected Regularized Orthogonal Matching Pursuit Algorithm

LONG Ken, WANG Hui

(Key Laboratory of Mobile Communications Technology of Chongqing, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: To overcome the drawback that the sparsity of channel impulse response is usually unknown in existing Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) systems, a weak selected regularized orthogonal matching pursuit algorithm is used for estimating sparse channel. Without the knowledge of the sparsity of channel, the algorithm judges the relevance coefficients between different iterative residue and atoms of measurement matrix, determines the number of atoms and the candidate atoms of the channel impulse response flexibly on the basis of a weak selection criterion, and then selects an optimal atom set for the channel impulse response from the candidate atoms according to the regularization principle, thus achieving accurate reconstruction progressively. Simulation results and theoretical analysis show that, compared with regularized orthogonal matching pursuit (OMP) algorithms, the proposed algorithm gets a much lower mean square error and bit error rate under the same condition; besides, as the algorithm does not need the channel sparsity as a priori information, it is much suitable for real application.

Key words: OFDM system; compressed sensing; sparse channel estimation; weak selected; regularized orthogonal matching pursuit

1 引 言

正交频分复用技术 (Orthogonal Frequency Divi-

sion Multiplexing, OFDM) 是当前及未来无线通信系统中广泛采用的关键技术之一。在 OFDM 系统中,

* 收稿日期:2014-04-30;修回日期:2014-06-11 Received date:2014-04-30;Revised date:2014-06-11

基金项目:国家科技重大专项(2013ZX03003014-004,2011ZX03003-003-02)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project(2013ZX03003014-004,2011ZX03003-003-02)

** 通讯作者: longken@cqupt.edu.cn Corresponding author: longken@cqupt.edu.cn

获取准确的信道状态信息对提高通信系统的性能具有重要作用,通常采用基于导频的信道估计^[1]得到。

无线多径信道往往建模为稀疏信道,即信道的绝大部分能量集中分布在少数几条主要路径上。大量研究表明,利用信道的稀疏特性将压缩感知技术应用于稀疏信道估计问题^[2-3],可以减少信道估计所需导频数量,有效提高频谱效率。其中,基于贪婪迭代类算法的稀疏信道估计,因具有重构效率高以及实时性好等优点而受到广泛研究与应用。文献[4]将正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)算法应用于 OFDM 系统信道估计中,使用少量的导频即可获得比传统估计算法更好的性能,频谱利用率提高。文献[5]将压缩采样匹配追踪算法应用在水声信道估计中,采用相等数量导频时,其性能将优于正交匹配追踪算法。文献[6]将子空间追踪算法应用于多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)系统信道估计中,针对多天线阵列的特点准确实现稀疏信道估计。然而,上述各算法都需要在预先知道信道稀疏度的情况下才能进行准确的信道估计,故实用性较差。针对上述问题,本文提出了一种基于弱选择正则化正交匹配追踪算法的稀疏信道估计方法,在未能预先知道信道稀疏度的情况下可以准确地估计出信道的冲激响应,且算法有效提升了信道估计性能。

2 系统模型

图 1 给出了 OFDM 系统框图。

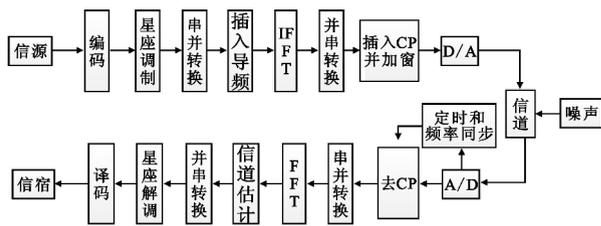


图 1 OFDM 系统框图
Fig. 1 Block diagram of OFDM system

此处考虑频率选择性衰落信道,信道模型建模为抽头延迟线模型:

$$h = \sum_{l=1}^L h(l) \delta(\tau - \tau_l) \quad (1)$$

式中, L 是信道长度, $h(l)$ 和 τ_l 分别是第 l 个抽头的复增益和延时。

设 OFDM 系统中有 N 个子载波,其中导频子载

波有 M 个。用 $X(k_1), X(k_2), \dots, X(k_M)$ 表示发送的导频符号, $Y(k_1), Y(k_2), \dots, Y(k_M)$ 表示接收到的导频符号,则 OFDM 系统信道估计问题可表示为

$$y = \mathbf{X} \mathbf{F}_{M \times L} \mathbf{h} + \mathbf{n} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{X} = \text{diag}\{X(k_1), X(k_2), \dots, X(k_M)\}$ 为对角矩阵; $\mathbf{y} = [Y(k_1), Y(k_2), \dots, Y(k_M)]$; $\mathbf{F}_{M \times L}$ 是从标准 $N \times N$ 傅里叶变换矩阵中选择的子矩阵,对应其前 L 列;令 $\mathbf{A} = \mathbf{X} \mathbf{F}_{M \times L}$,式(2)进一步表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{A} \mathbf{h} + \mathbf{n} \quad (3)$$

其中, \mathbf{n} 是信道复加性高斯白噪声, $\mathbf{h} = [h(1), h(2), \dots, h(L)]$,即式(1)所示的信道冲激响应。

3 信道估计

应用正则化正交匹配追踪^[7](Regularized Orthogonal Match Pursuit, ROMP)算法进行信道估计时,每次迭代计算不同迭代余量与测量矩阵(即矩阵 \mathbf{A} ,表示的是选定导频序列矩阵与傅里叶变换子矩阵的乘积)中各原子(即测量矩阵中的列向量)的相关系数,随后选择出和信道稀疏度相等个数的原子作为候选集 J ,当信道稀疏度估计错误时,造成估计性能无法满足系统要求,因此信道稀疏度的判定对信道估计效果有重要影响。而实际通信中,通常很难准确获取信道稀疏度。基于此,提出基于弱选择准则^[8]的正则化正交匹配追踪算法,在 ROMP 算法的基础上,引入了原子的弱选择准则:

$$\{i | |g_i| \geq \alpha \cdot \max_j |g_j|\} \quad (4)$$

式中, $i, j \in J, g$ 为迭代余量与观测矩阵中原子的相关系数, α 为弱选择因子, $\alpha \in (0, 1]$ 。将所有满足式(4)的原子对应的抽头位置并入候选集,就完成了原子的一次弱选择过程。这样就使得算法在信道估计时不受稀疏度的影响,并且可以根据实际情况灵活确定出表示信道冲激响应的原子数目及原子候选集,优化信道估计性能。特别地, $\alpha = 1$ 时,即只选择了一个具有最大相关性的原子。算法的具体步骤为:

(1) 参数初值:残差 $r_1 = y$, 迭代次数 $t = 1$, 索引集 $\mathbf{A} = \emptyset$, 候选集 $\mathbf{J} = \emptyset$;

(2) 迭代步骤(第 t 次迭代):

① 求迭代残差 r_t 与测量矩阵 \mathbf{A} 中各原子 \mathbf{a}_j 的相关系数 $\{g_j | g_j = \langle r_t, \mathbf{a}_j \rangle\}, j \in (1, 2, \dots, L)$, 将满足式(4)的原子存入候选集 \mathbf{J} ;

② 利用正则化原则对 \mathbf{J} 中原子进行分组,其中

原子的相关系数须满足^[7]: $|g_i| \leq 2|g_j| (i, j \in J)$, 结果存入集合 J ;

③更新支撑集 A_Λ , 即从测量矩阵中选择的子矩阵表示的是选定抽头位置对应的原子集合, 其中 $A = A \cup J$;

④估计值: $\hat{\mathbf{h}} = \operatorname{argmin}_h \|\mathbf{y} - A_\Lambda \mathbf{h}\|_2$, 更新残差: $\mathbf{r}_{t+1} = \mathbf{y} - A_\Lambda \hat{\mathbf{h}}$;

⑤满足迭代停止条件, 则输出 $\hat{\mathbf{h}}$; 否则, $t = t + 1$, 继续过程 2。

实际中可以选择多种迭代停止准则, 如设定迭代最大值 $t \geq T$ 、判定实际信道冲激响应值与估计值之差小于某一阈值 $|\mathbf{h} - \hat{\mathbf{h}}| \leq \varepsilon$ 或者判定迭代残差小于某一阈值 $\mathbf{r} \leq \varepsilon$ 等, 文中选择的是 $|\mathbf{h} - \hat{\mathbf{h}}| \leq \varepsilon$ 准则。

分析以上步骤, 迭代过程①中原子的弱选择准则可使稀疏信道估计过程不受稀疏度的限制; 同时迭代过程⑤中停止准则的选择使得可以根据不同迭代残差 \mathbf{r} 与测量矩阵 A 中各原子的相关系数, 灵活地确定出表示信道冲激响应的原子个数和候选集; 最后正则化准则保证可以有效的选择出表示信道冲激响应的最佳原子组, 改善了估计性能, 并且使算法稳定性增强。但是, 弱选择因子的取值范围以及停止准则的确定有待进一步研究。

4 仿真与性能分析

为验证算法的性能, 进行了以下仿真。系统参数如表 1 所示, 文中所有仿真都是基于该参数设置。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数名称	取值
子载波总数 N	512
导频数 M	36
信道长度 L	50
循环前缀长度	64
调制方式	16QAM
多径数	6
导频放置方式	随机
信噪比范围/dB	0 ~ 30
迭代停止系数 ε	10^{-3}

多径信道模型中各径时延在 $(0, \tau_{\max})$ 上随机分

布, τ_{\max} 为最大路径时延, 路径增益服从复高斯分布, 且路径复增益的功率随路径时延的增大以指数 $\exp(-\tau_i/\tau_{\max})$ 衰落^[9]。用误比特率 (Bit Error Rate, BER) 和均方误差 (Mean Square Error, MSE) 来衡量各种算法的性能, 并定义 MSE 为

$$MSE = \frac{E(\|H - \hat{H}\|_2^2)}{E(\|H\|_2^2)} \quad (5)$$

式中, H 和 \hat{H} 分别表示信道频域响应值以及信道频域响应的估计值。

4.1 弱选择因子 α 对 BER 性能的影响

图 2 给出弱选择因子对误比特率性能的影响。其中“理想信道”表示信道状态信息已知时的误比特率性能曲线。可以看出, 不同的因子 α 对误比特率性能的影响较大, 当 α 较小时, 由于选择的候选原子数偏多, 将引入噪声误差, 使得误比特率性能较差; 而当 α 大于某一值时, 选择的候选集中原子个数基本与实际信道稀疏度相符, 误比特率性能将随着信噪比的增加而显著提升。由仿真结果可知, 当 $\alpha \in (0.6, 1]$ 时, 改进算法的误比特率性能较优。

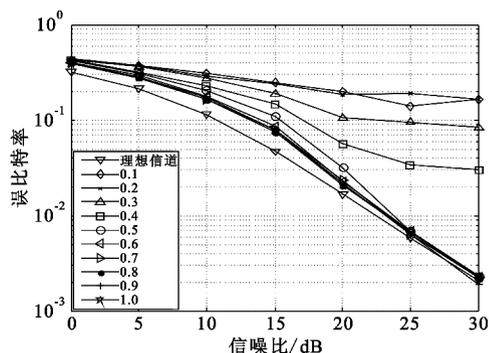


图 2 弱选择因子对误比特率性能的影响

Fig. 2 The effect of α on BER

4.2 不同算法的 MSE 和 BER 性能对比

图 3 和图 4 分别比较了不同算法的误比特率和均方误差性能。此时, 弱选择因子 α 分别取值 0.7、0.8 和 0.9。可以看出, 3 种算法的性能均随着信噪比的增加而逐渐提高。在信噪比较低时, 改进算法与 ROMP^[7] 算法的性能接近, 性能优势不明显; 在信噪比增大时, 改进算法基于原子弱选择准则, 由于不需要每次都选择出与信道稀疏度相同个数的原子, 使得估计效果显著提升, 改进算法和 OMP^[4] 算法的性能都优于 ROMP 算法, 并且随着信噪比的增加改进算法的性能将与 OMP 算法一致。

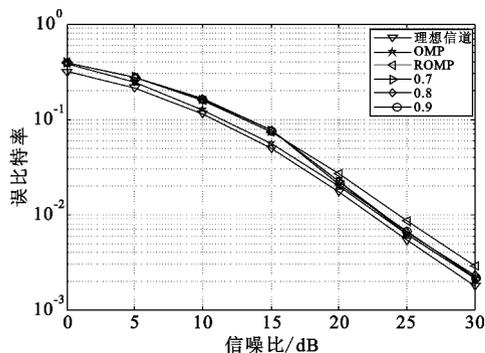


图3 不同算法误比特率性能

Fig. 3 The BER comparison of different algorithms

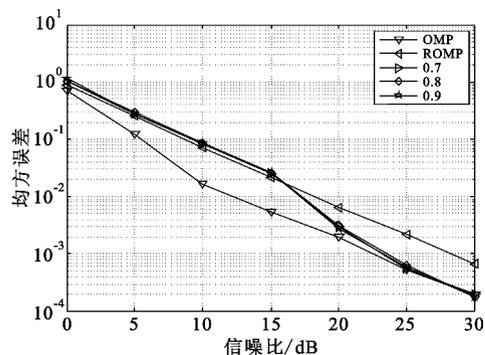


图4 不同算法均方误差性能

Fig. 4 The MSE comparison of different algorithms

4.3 计算复杂度比较

下面首先对 OMP 算法、ROMP 算法和改进算法的计算复杂度进行定量分析。

参数 K 为信道稀疏度, M 为导频数量, L 为信道长度, 满足 $K < M < L$ 。仅考虑乘法运算的复杂度, 若 A 为 $O \times Y$ 维矩阵, B 为 $Y \times P$ 维矩阵, 则内积 $\langle A, B \rangle$ 运算产生的复杂度为 $O(OYP)$ 。矩阵 A 的伪逆运算复杂度为 $O(Y^3) + O(2Y^2O)$ 。

OMP^[4] 算法迭代过程中每次只选择一个原子, 其总迭代次数等于信道的稀疏度 K , 每次迭代先进行一次矩阵内积运算, 求估计值时进行一次伪逆运算及一次矩阵内积运算。整个过程中伪逆矩阵的阶数由一阶逐步增大到 K 阶, 更新残差时进行一次矩阵内积运算。总复杂度为

$$O(KML) + \sum_{D=1}^K (O(D^3) + O(2D^2M) + O(2DM))$$

其中, D 为伪逆矩阵的阶数, D 最大值即为信道稀疏度 K 。

ROMP^[7] 算法每次迭代有一次矩阵内积运算, 求估计值时一次伪逆运算、一次矩阵内积运算以及更新残差时一次矩阵内积运算。由于 ROMP 算法

每次选择的原子数量介于 $1 \sim K$ 个, 最多经过 K 次迭代就可以选择出需要的支撑集。总复杂度介于 $O(ML) + O(K^3) + O(2K^2M) + O(2KM)$ 和 $O(KML) + \sum_{D=1}^K (O(D^3) + O(2D^2M) + O(2DM))$ 之间。

改进算法每次迭代中有一次矩阵内积运算, 求估计值时一次伪逆运算、一次矩阵内积运算以及更新残差时一次矩阵内积运算。由于每次原子选择数量大于等于 1 个, 最大迭代次数一般不会超过 K 次。总复杂度范围大致与 ROMP 算法相同, 具体取值由实际选定的弱选择因子决定。

随后用算法的平均运行时间对其进行更直观的对比。仿真工具为 MATLABR2008b, 仿真计算机配置为 2.8 GHz 英特尔双核, 2 GB 内存, Microsoft XP 操作系统。表 2 给出各种算法的平均运行时间, 可以看出, 各算法实际运行时间与上述理论复杂度分析一致。改进算法比 ROMP 算法的运算时间长, 这是由于原子的弱选择方式增加了信道估计时的运算量所致。此外, 随着弱选择因子增大, 由于每次迭代选择的原子数减少, 使得算法运行时间逐步增加。而与 OMP 算法相比, 改进算法运行时间更短, 算法的收敛速度较快, 即算法运行时间与估计性能是一致的。而且与其他算法相比, 因改进算法不需要预先知道信道冲激响应的稀疏度, 故该算法可以更好地满足实际应用的需要。

表 2 各种算法运行时间比较
Table 2 Running time for different algorithms

算法	平均运行时间/s
OMP	0.130 2
ROMP	0.048 2
$\alpha=0.7$	0.058 1
$\alpha=0.8$	0.071 5
$\alpha=0.9$	0.096 0

5 结论

本文针对基于 ROMP 算法的稀疏信道估计必须已知信道稀疏度的不足, 提出了一种基于弱选择正则化正交匹配追踪算法的 OFDM 系统稀疏信道估计方法。该方法在信道稀疏度未知的情况下, 根据原子的弱选择准则自适应地确定出表示信道冲激响应的原子数量和候选集, 准确地估计出信道的冲激响应。仿真结果表明, 改进算法有效提升了信道估计性能, 并且比较实用。

然而, 原子的弱选择方式增加了算法重构时的

计算量,此方面的性能有待进一步改进。此外,本文只考虑了算法在 OFDM 时域稀疏信道下的应用,算法在频域稀疏信道、时频双选择性信道以及其他通信系统中的应用等都是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 龚钢,雷维嘉,谢显中. 基于梳状导频分布的 OFDM 信道估计改进方法[J]. 电讯技术,2011,51(4):102-105.
GONG Gang, LEI Wei-jia, XIE Xian-zhong. An improved channel estimation algorithm based on comb-type pilot in OFDM systems [J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(4):102-105. (in Chinese)
- [2] 丁敬校,王可人,金虎,等. 一种基于 RAMP 算法的 OFDM 稀疏信道估计方法[J]. 电讯技术,2012, 52(3):357-361.
DING Jing-xiao, WANG Ke-ren, JIN Hu, et al. An OFDM sparse channel estimation method based on regularized adaptive matching pursuit algorithm[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(3):357-361. (in Chinese)
- [3] 王平,阮怀林,樊甫华,等. 基于压缩感知超宽带信号盲稀疏度信道估计[J]. 电讯技术,2012,52(11):1791-1795.
WANG Ping, RUAN Huai-lin, FAN Pu-hua, et al. Channel estimation based on compressed sensing UWB signal blind sparsity [J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(11):1791-1795. (in Chinese)
- [4] 何雪云,宋荣方,周克琴. 基于压缩感知的 OFDM 系统稀疏信道估计新方法研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版),2010,30(2):60-65.
HE Xue-yun, SONG Rong-fang, ZHOU Ke-qin. Study of compressive sensing based sparse channel estimation in OFDM systems[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2010, 30(2):60-65. (in Chinese)

- [5] WANG Biao, CHEN Yan. Sparse underwater acoustic channel estimation based on compressive sensing[J]. Information Technology Journal, 2013, 12(5):1040-1044.
- [6] CHEN En-qing, XIANG Xiao-qiang, MU Xiao-min. Channel estimation for MIMO-OFDM systems based on subspace Pursuit algorithm[C]//Proceedings of 2013 International Symposium on Circuits and Systems. Beijing: IEEE, 2013:1151-1154.
- [7] Needell D, Vershynin R. Uniform uncertainty principle and signal recovery via regularized orthogonal matching pursuit[J]. Foundations of Computational Mathematics, 2009, 9(3):317-334.
- [8] Blumensath T, Davies M E. Stagewise weak gradient pursuit[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(11):4333-4346.
- [9] 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.

作者简介:



龙恩(1978—),男,重庆人,2009年于北京邮电大学获博士学位,现为讲师,主要研究方向为下一代无线移动通信;

LONG Ken was born in Chongqing, in 1978. He received the Ph. D. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2009. He is now a lecturer. His research concerns the next generation wireless mobile communication.

Email:longken@cqupt.edu.cn

王慧(1989—),女,山东人,硕士研究生,主要研究方向为下一代无线移动通信中的信道估计。

WANG Hui was born in Shandong Province, in 1989. She is now a graduate student. Her research concerns channel estimation for the next generation wireless mobile communication.

Email:dzwanghui@126.com