

基于压缩感知的低压电力线载波通信信道估计

齐萌, 赵利国

(洛阳理工学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 针对低压电力线通信环境多径干扰的特点, 建立了正交频分复用的压缩感知信道估计模型, 将信道估计转换为压缩感知理论中稀疏度未知的号重构问题, 首次采用压缩感知的稀疏自适应匹配追踪方法重构出低压电力线载波通信多径信道的冲击响应; 仿真表明与其它常用信道估计算法相比, 所提出的压缩感知信道估计算法在频谱利用率以及估计性能方面比传统方法有显著提高, 在未知稀疏度的情况下, 为低压电力线载波通信系统提供了一种稳定、可行的信道估计方案。

关键词: 电力线载波; 正交频分复用; 压缩感知; 信道估计

Channel Estimation for LV-PLC Systems Based on Compressed Sensing

Qi Meng, Zhao Liguo

(Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: According to the multipath characteristics of a low-voltage power line carrier communication (LV-PLC) channel, orthogonal frequency division multiplexing and compressed sensing channel estimation model are introduced, the paper transforms the channel estimation into the reconstruction of sparse signal without the information of the sparsity in compressed sensing. We proposed sparsity adaptive matching pursuit (SAMP) method to reconstruct of low voltage power line carrier communication multipath channel impulse response for the first time. Simulation results show that compared with other common channel estimation algorithms, the proposed compressed sensing channel estimation algorithm in spectrum utilization and estimation performance has significantly improved than the traditional methods.

Keywords: power line carrier communication; orthogonal frequency division multiplexing; compressed sensing; channel estimation

0 引言

随着电力系统的发展以及智能电网建设的不断深入, 低压电力线载波通信 (Low-Voltage Power Line Carrier Communication, LV-PLC) 利用低压电力线作为传输媒介, 有着其他通信方式没有的广阔发展场景和经济价值^[1-2]。但是由于低压电力线负载多、拓扑结构复杂、具有严重的频率选择性衰减制约了高速数据的传输。近年来, 具有频谱利用率高、有效对抗频率选择性衰减等特点的正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 广泛应用于电力线宽带通信设计中^[3]。当用电力线进行通信时, 接收端信道均衡、检测和和相关检测都需要精确的信道状态信息 (channel state information, CSI)。因此在低压电力线通信中如何准确获取准确的 CSI 是保证通信质量的关键环节之一。近年快速发展的压缩感知 (compressed sensing, CS)

理论将 OFDM 信道估计转换为稀疏恢复问题^[4-5], 可有效利用多径信道稀疏特性提高信道估计性能。压缩感知理论在移动无线通信、水声通信中已得到较为广泛的研究应用, 但在 PLC 通信领域尚未多见。文献 [6] 提出一种基于窄带干扰消除的 PLC 系统压缩感知方法, 把高维的窄带干扰信号通过 CS 重构, 但没有涉及信道稀疏性。文献 [7] 提出了将压缩感知的正交匹配追踪 (OMP) 算法应用到 PLC 信道估计中, 对其

时域多径信道的冲击响应进行估计, 通过与传统估计算法对比, 能够获得良好的估计性能, 但该算法需要预先知道稀疏度。

考虑到 LV-PLC 多径信道传输的特点, 本文推导了满足 CS 条件的低压电力线载波通信多径传输模型, 提出一种基于稀疏自适应匹配追踪 (sparsity adaptive matching pursuit, SAMP) 的信道估计方法, 有效解决了文献 [7] 中 OMP 算法需要预先知道信号稀疏度的问题。该算法在重构过程中先对信号稀疏度进行初始估计, 然后自适应调整步长逐步逼近信号, 相较于其他 CS 算法, 能够无需知道信号的稀疏度情况下准确重建稀疏信号, 最后通过 Matlab 仿真实验表明了本文方法的有效性。

1 电力线信道模型

低压电力线信道环境比较恶劣, 传输路线中接有不同种类的电气设备, 由于电气设备工作状态的时变性, 导致传输通道的阻抗不能匹配, 从而产生多径效应。电力线网络中存在大量如图 1 所示的分支结构和阻抗不匹配节点。

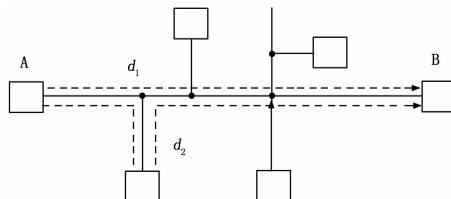


图1 电力线载波信道多径传输模型

收稿日期: 2016-07-05; 修回日期: 2016-07-22。

作者简介: 齐萌 (1984-), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事信号处理方向的研究。

在文献 [8] 中传输在电力线上的信号由发送节点 A 到达接收节点 B 的信道可用下式进行表示:

$$H(f) = \sum_{l=1}^L g_l(f) e^{-(\alpha_0 + \alpha_1 f^k) d_l} e^{-j2\pi f \tau_l} \quad (1)$$

式中, g_l 为第 1 个传输路径的权重因子 ($g_i \leq 1$); α_0 、 α_1 为衰减参数; k 为衰减因子指数, 其值在 0.5 到 1 之间; 路径时延 $\tau_l = d_l \sqrt{\epsilon_r}/c_0$, d_l 为电力线长度, ϵ_r 为电力线介电常数, $c_0 = 3 \times 10^8$ m/s; L 为多径路径数, 当 L 越大时, 误差越小, 反之误差越大。通过式 (1) 建立的 PLC 信道的模型和无线信道一样是一个多径模型, 在频域具有明显的频率选择性衰落特性, 即信号传输过程中在某些频率点上存在严重衰落的现象。进行 IFFT 变换由频域变换到时域如式 (2) 所示为电力线信道的冲击响应 $h(t)$ 。

$$h(t) = \sum_{l=1}^L k_l \delta(t - \tau_l) \quad (2)$$

上式中, k_l 表示第 1 条路径的权重因子, τ_l 为第 1 条路径对应的多径延时。文献 [10] 指出电力线信道表现出稀疏特性, 能够运用压缩感知 (CS) 技术对信道冲击响应进行压缩采集, 只需在接收端存储少量特征信息, 运用 CS 重构算法和采集压缩的特征信息重构电力线信道冲击响应。

2 OFDM 系统

本文所采用的 OFDM 系统框图如图 2 所示。

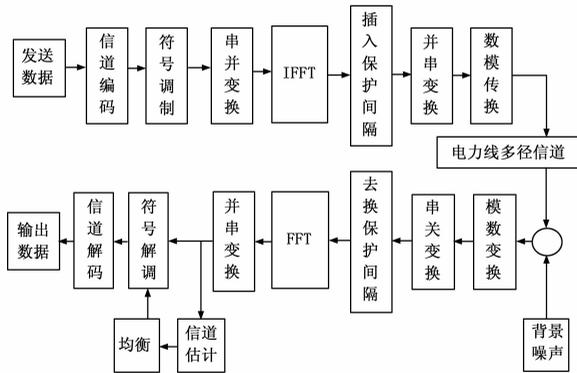


图 2 OFDM 系统框图

在发送端, 二进制信息数据经过信道编码、符号映射, 通过串并变换然后进入调制模块进行 N 点傅里叶逆变换由频域转换到时域, 为了补偿信道的弥散时间影响, 引入循环前缀 (CP) 作为保护间隔, CP 的长度要大于最大的路径时延。

在接收端, 对时域信号进行傅里叶变换得到 $Y(k)$ 可表示为:

$$Y = XFh + n \quad (3)$$

$Y = [Y(k_1), Y(k_2), \dots, Y(k_N)]^T$ 是接收信号的频域形式, $X = \text{diag}\{X(k_1), X(k_2), \dots, X(k_N)\}$ 是发射信号的频域形式, $h = [h_1, h_2, \dots, h_L]^T$ 是信道冲击响应, n 是信道复加性高斯白噪声, F 是 N 点离散傅里叶变换矩阵的前 L 列如下表示:

$$F = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} F_N^{00} & F_N^{10} & \dots & F_N^{(L-1)0} \\ F_N^{01} & F_N^{11} & \dots & F_N^{(L-1)1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_N^{0(N-1)} & F_N^{1(N-1)} & \dots & F_N^{(L-1)(N-1)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $F_N^{nl} = e^{-j2\pi nl/N}$ 。假设导频数目为 m , 导频选择矩 $P_m = [s_{p1}, s_{p2}, \dots, s_{pm}]^T$, 标识导频位置的索引集, $P_m X$ 用于从 N 个子载波中提取出 m 个导频数据, 则有:

$$Y_m = X_m F_m h + n_m \quad (5)$$

式中, Y_m 是接收端的导频数据, X_m 是已知的导频符号, F_m 部分傅里叶矩阵, 三者接收端均已知, 可以通过不同信道估计方法得到信道冲击响应 h 。

3 基于 CS 的信道估计

压缩感知是针对可压缩信号即稀疏信号抽样和压缩同时进行, 通过较少的测量值就可以重构出原始信号的技术^[10]。对信号 x , 如果 x 中只有 K 个 ($K < N$) 非零元素, 而其它 $N-K$ 个元素都为零, 则称 x 是 K 稀疏的。通过观测矩阵可以获得 x 的观测值:

$$y = \Phi x + e \quad (6)$$

式中, e 为噪声。若 $M \geq K \cdot \lg N$, 且观测矩阵满足有限等距特性 (restricted isometry property, RIP), 则可以通过寻找式 (6) 的最稀疏解来恢复信号 x 。因此如何有效地从测量信号 y 恢复出原始信号 x 是实现压缩感知的关键之一。经典的信号重建算法是基于最小 l_1 范数的重构问题为:

$$\hat{x} = \text{argmin}_x x_1 \quad (7)$$

在压缩感知框架下, 文献 [7] 证明了式 (5) 中 h 为稀疏向量以及观测矩阵 Φ 满足 RIP 的性质, 对比式 (5) 和 (6) 可以看出, 令 $y = Y_m \Phi = X_m F_m$, $x = h$, 只要选择合适的重构算法就可以恢复出 h 。本文采用基于 SAMP 算法进行信道重建。

SAMP 重构算法是一种匹配追踪系列算法, 和 OMP 相比, 它的特点是在不知道稀疏度的前提条件下, 采用了回溯的思想, 自适应分阶段地迭代估计稀疏度和非零元素的位置。基于 SAMP 的信道估计算法步骤如下:

输入: 观测矩阵 Φ ($\Phi = X_m F_m$), 观测值 y ($y = Y_m$), 自适应步长 S , 阈值 ϵ 。

初始化: 残差 $r_0 = y$, 初始化迭代次数 $n=1$, 非零元素位置索引集 $\Lambda = \emptyset$, 支撑集 $T = \emptyset$, 阶段次数 $j=1$, 第一阶段稀疏度 $K = s$ 。

Step1: 计算 $u = \text{abs}[\Phi^T r_{n-1}]$, 选择 u 中的 K 个最大值, 将这些值对应的索引值保存到集合 S_n 中;

Step2: 更新支撑集 $C_k = \Lambda_{n-1} \cup S_n$;

Step3: 求最小二乘解, $\hat{x} = \text{argmin}_y y - \Phi_n x_2$, 选出 \hat{x} 中前 K 个最大元素对应的索引值并放入 T_n 中;

Step4: 计算残差 $r_n = y - \Phi_n \hat{x}$

Step5: 若 r_n 小于 ϵ , 则跳出循环体; 否则进一步判断: $\|r_n\|_2 \geq \|r_{n-1}\|_2$, 则转入下一阶段, 即 $j=j+1$, $K=j \times s$; 否则, 继续在本阶段里迭代 $n=n+1$, 更新支撑集 $T_n = T_{n-1}$

输出: 各个信道的重构多径稀疏 h 和稀疏位置集 Λ 。

SAMP 与 OMP 算法都是贪婪迭代的方法, SAMP 先对信号的稀疏度进行初始估计, 再使用残差比对的方法, 来决定是否增加稀疏度。初始步长的选取对算法性能影响较大, 对于信道估计这样的低维信号恢复问题, 可以选取较小的初始步长值, 复杂度较低, 且可以达到较高的恢复精度。对于有噪声干扰的情况, 则可将阈值 ϵ 设为噪声的平均功率^[11]。

4 仿真和性能分析

本文选取典型的 6 径 PLC 参考信道进行仿真分析, 具体

参数如表 1 所示。利用 MATLAB 2014a 软件仿真电力线的时域和频域特性，依照表 1 进行参数设置，频率范围为 0~20 MHz，采样频率 40 MHz， $\alpha_0 = 0$ ， $\alpha_1 = 7.8 \times 10^{-10}$ s/m。频域响应和时域响应图形见图 3、图 4。由图 3~4 明显看出电力线信道传输特征具有明显的稀疏特性。

在 OFDM 低压电力线载波通信系统的信道估计的仿真中为了验证算法的有效性，本文选择了 SAMP、OMP 算法以及传统的 LS 算法进行了比较。系统仿真设置见表 2。

表 1 低压电力线载波通信多径信道模型参数

多径参数		
第 l 径	g_l	d_l
1	0.87	65
2	0.78	120
3	0.65	171
4	0.57	246
5	0.49	366
6	0.40	200

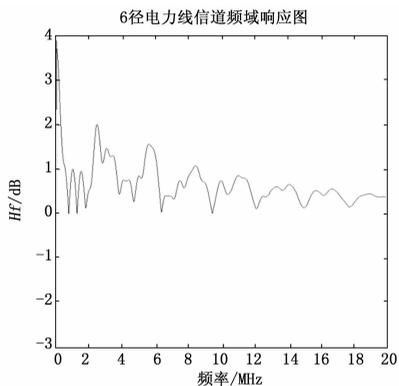


图 3 电力线频域响应

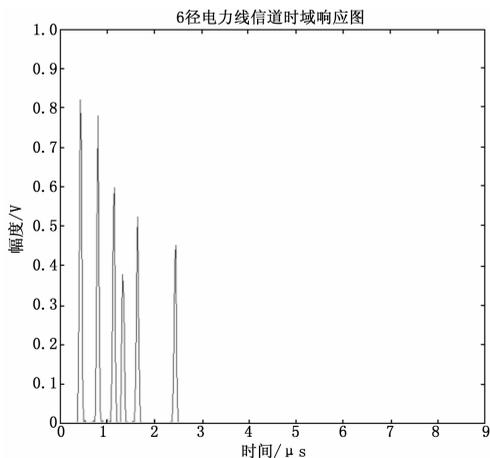


图 4 电力线时域响应

为了验证算法的性能，在可获取准确信道特性的情况下，信道估计算法的性能可用信道估计的均方误差 (MSE, mean square error) 和误码率 (SER, Symbol Error Rate) 来衡量，定义信道估计的均方误差为：

$$MSE = E[|h'_{i,j} - h_{i,j}|^2] \quad (8)$$

其中 h'_i 和 h_i 分别表示某一次的信道估计结果与真实值。

图 5 仿真了导频数都是 32 时，LS 算法、OMP 算法和 SAMP 算法的 MSE 性能。从仿真图上可看出在稀疏频率选择衰落信道下，采用传统均匀导频的 LS 方法估计的 MSE 与信噪比的关系几乎为水平直线，也就是说即使 SNR 很大，估计的精度也很低；OMP 和 SAMP 的导频随机放置，两种算法的 MSE 性能均随着信噪比的增加而逐渐降低，明显优于 LS 算法，在低信噪比时，SAMP 与 OMP 相比性能提高不明显，而信噪比高于 10 dB 时，SAMP 获得的 MSE 要比 OMP 小。

表 2 仿真参数

参数名称	取值
载波数	1 024
循环前缀长度	128
调制方式	QPSK
信道长度	50
多径数	6
导频数	32, 64
导频放置方式	均匀、随机
阈值	噪声平均功率

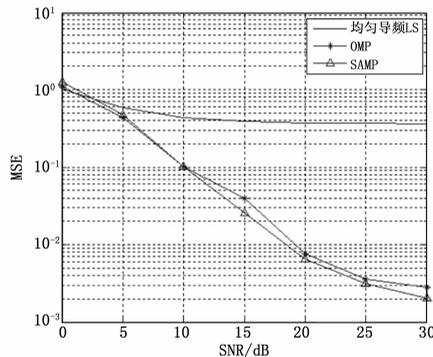


图 5 不同算法的 MSE 比较

图 6 仿真了导频数目分别为 32、64 和 256 时，LS 算法、OMP 算法和 SAMP 算法的 MSE 性能。从仿真图上可看出随着信导频数的增多，估计精度明显提高。当 MSE 等于 10^{-2} 时，

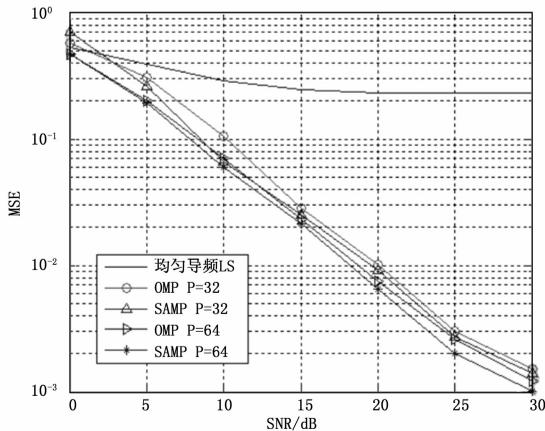


图 6 导频数不同时，不同算法的 MSE 比较

时, 为了满足发动机动力性的要求, 空燃比应随着节气门开度的增加而减小。

6 结论

1) 用仿真软件 Ricardo Wave 建立的发动机模型代替实际发动收集数据, 可重复性强, 能够减少发动机运行成本和时间。

2) 确立了一种基于发动机模型对控制参数标定的方法。该方法将现代 DoE 试验设计、数学统计和标定技术结合起来, 不仅可以优化发动机, 提高发动机的动力性, 还可以极大的减少标定成本, 减少标定时间, 缩短开发周期。优化前的最大扭矩为 198 Nm, 而优化后的最大扭矩为 215 Nm。

参考文献:

[1] 倪计民, 杨挺然, 杨 健. 基于模型的高压共轨柴油机电控参数优化 [J]. 内燃机工程, 2008, 29 (1): 6-10.

[2] 赵宏志. 汽油机动力总成系统匹配标定及优化研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2011.
[3] 李云清, 王海鹰, 成传松, 等. 联合 Boost 和 Matlab 基于模型的仿真和标定方法研究 [J]. 内燃机工程, 2010, 31 (4): 78-82.
[4] Ho T, Karri V. Optimizing the sum performances of ignition timing and air to fuel ratio on torque of hydrogen powered car [A]. In The 15th Asia Pacific automotive Engineering Conference [C]. 2009, 15 (149): 1-7.
[5] Kianifar M R, Campean L F, Richardson D. Sequential DoE Framework for Steady State Model Based Calibration [J]. SAE International Journal of Engines, 2013, 6 (2): 843-855.
[6] 夏广文, 张云龙, 韩韶辉, 等. 汽油机电控系统标定试验方法的研究 [J]. 内燃机工程, 2002, 23 (4): 82-85.
[7] 胡德胜. 基于模型的汽油机气路系统控制 map 标定 [D]. 吉林: 吉林大学, 2015.
[8] 范宝伟, 潘剑锋, 陈 瑞, 等. 点火提前角对天然气转子发动机燃烧过程的影响 [J]. 兵工学报, 2014, 35 (1): 1-8.



(上接第 256 页)

SAMP 在导频 $p=32$ 时, 信噪比也比 LS 在导频 $p=256$ 时低 1 dB。换句话说, 如果要获得导频数是 256 时的 LS 信道估计性能, 用 OMP 与 SAMP 仅需要导频等于 32。所以, 用压缩感知的方法将会大大减少导频的数量, 提高整个系统的吞吐量。

图 7 仿真了 LS 算法、OMP 算法和 SAMP 算法的 SER 性能, 随着信噪比的增加, SAMP 算法的估计精度越来越高, 并且一直优于其他两种算法, 由此可见 SAMP 作为贪婪迭代类算法的一种, 不需要稀疏度作为先验条件, 更加适合低电压电力线载波通信信道估计这样的实时应用。

参考文献:

[1] Chen C S, Ku T, Lin C H. Design of PLC-based Identifier to Support Transformer Load Management in Taipower [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46 (3): 1072-1077.
[2] Zhai M Y. Transmission Characteristics of Low-voltage Distribution Networks in china under the smart Grids Environment [J]. IEEE Transactions on Power Deliver, 2011, 26 (1): 173-180.
[3] 唐良瑞, 张 勤, 张 平. 正交频分复用系统中基于迭代插值的低压电力线信道估计 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (1): 98-102.
[4] Ren X, Chen W, Tao M. Position-based compressed channel estimation and pilot design for high-mobility OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64 (5): 1918-1929.
[5] 陈书贞, 张亚静, 练秋生. OFDM 系统中基于压缩传感理论的信道估计算法 [J]. 信号处理, 2010, 26 (1): 157-160.
[6] Sicong Liu, Fang Yang, Chao Zhang, Jian Song. Compressive sensing based narrowband interference cancellation for PLC systems [J]. 2014 IEEE Global Communications Conference, 2014, 298-299.
[7] 郭俊龙, 王学伟, 王 琳. 低压电力线载波通信压缩感知信道估计方法 [J]. 北京化工大学学报 (自然科学版), 2016, 43 (3): 111-114.
[8] Zimmermann M, Dostert K. A multipath model for the power line channel [J]. IEEE Transactions on Communication, 2002, 50 (4): 553-559.
[9] Wenbo Ding, Yang Lu, Fang Yang, Wei Dai, Jian Song. Sparse Channel State Information Acquisition for Power Line Communications [A]. 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC) [C]. 2015: 746-751.
[10] Do T T, Gan L, Ngugen N H. Sparsity adaptive matching pursuit algorithm for practical compressed sensing [A]. Proceedings of the 42nd Asilomar Conference on Signal Systems and Computers [C]. Piscataway: IEEE, 2008: 581-587.
[11] 陈恩庆, 相小强, 穆晓敏. 基于压缩感知的 MIMO-OFDM 系统稀疏信道估计算法 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2013, 34 (6): 6-9.

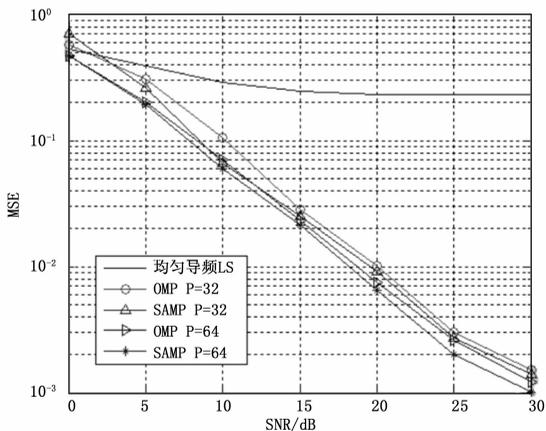


图 7 不同算法的 SER 比较

6 结论

笔者围绕低压电力线载波通信系统信道估计问题, 研究了基于压缩感知的信道估计方法。针对低压电力线通信环境多径干扰的特点, 建立了 CS 信道估计模型, 将信道估计转换为压缩感知信号重构问题, 首次采用压缩感知的稀疏自适应匹配追踪方法重构出低压电力线载波通信多径信道的冲击响应。仿真表明, 基于 SAMP 的信道估计方法与其它常用信道估计算法相比, 在频谱利用率以及估计性能方面比传统方法有显著提高。同时, 在未知稀疏度的情况下, 为低压电力线载波通信系统提供了一种稳定、可行的信道估计方案。