



一种压缩感知电力线信道估计机制

何业慎¹, 梁琨²

(1. 深圳市国电科技通信有限公司, 广东 深圳 518031;

2. 天津科技大学计算机科学与信息工程学院, 天津 300222)

摘要:通过分析电力线信道传输特性, 建立相应的数学模型, 研究了电力线信道的多径特性, 并结合一种新颖的压缩感知处理技术, 提出了一种基于压缩感知的电力线信道估计方法。通过分析研究电力线信道传输特征, 利用其稀疏性, 只需采集、提取、存储少量的噪声与信道特征有效参数, 大大降低了数字信号处理模块的数据处理量, 降低了对存储硬件的要求与硬件成本。

关键词: 电力线通信; 信道估计; 压缩感知

中图分类号: TN913

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016278

A power line channel estimation mechanism based on compressed sensing

HE Yeshen¹, LIANG Kun²

1. China GRIDCOM Co., Ltd., Shenzhen 518031, China

2. Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China

Abstract: Through the analysis of power line channel characteristics, the corresponding mathematical model was established, the multipath channel characteristics of power line were studied. Combined with a novel compressed sensing and processing technology, a channel estimation method of power line based on compressed sensing was proposed. The transmission characteristics of power line channel were analyzed. Taking advantage of its sparse, only a small amount of noise and channel parameters needed to be collected, extracted and stored, which greatly reduced the digital signal processing module of data processing, and the storage hardware requirements and hardware costs were reduced.

Key words: power line communication, channel estimation, compressed sensing

1 引言

随着电力线通信技术的不断发展, 电力线网络已经不再是专门用来传输电能的网络, 考虑到电力线网络的普遍存在性以及用户随时随地的接入特性, 电力线网络也可以

用于传输多类型的信息^[1]。由于电力线网络是为传输电能设计的, 因此, 电力线信道特性与其他通信信道特性的差异极大, 电力线上的噪声已不是其他通信环境中单一的高斯白噪声, 电力线噪声非常复杂。随着用电设备的随机接入和切出, 电力线信道具有很强的时变特性^[2,3], 并且信道



状态信息对于相关数据检测、信道量化以及干扰抑制等至关重要。因此,需要对电力线信道传输特性以及电力线信道估计方法进行进一步的分析和研究^[4-6]。传统的信道估计方法大致可以分为三大类:非盲信道估计,是最传统的信道估计方法,主要利用发送端的导频信号反映信道的主要特性;盲信道估计,是一种不需要发送导频信号的信道估计方法;半盲信道估计,是综合以上两种信道估计方法的一种折中方法^[7]。传统的信道估计方法需要很高的模数转换速率,接收端为了精确地估计信道特性,需要发送很长的导频信号,并采集大量的样本数据,这无疑提高了接收端的硬件复杂度和硬件成本。

研究表明,电力线信道是线性时变信道,能够使用基于 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing,正交频分复用)的导频信号估计电力线信道传输特性,但这种信道估计机制忽略了对接收端 ADC 器件的要求^[8]。在无线通信场景中,一种基于压缩感知的无线信道估计方法能够通过接收端的正交匹配追踪(orthogonal matching pursuit, OMP)算法重构出无线信道传输特性^[9-11]。本文提出了一种基于压缩感知的电力线信道估计方法,通过分析电力线信道本身所具有的稀疏特性,运用压缩感知技术在发送端发送合适的导频信号,经过电力线信道时延和衰减,在接收端对电力线信道的有效特征进行提取,从而完成电力线信道估计。

2 电力线信道估计模型

电力线信道估计模型包括发送端和接收端两大部分。发送端用于发送合适的导频信号,经过耦合电路放大耦合到电力线上,经过实际电力线信道环境的影响,在接收端进行信道估计,得到电力线信道传输特征。如图1所示,发送信号包括有效信号及导频信号,经过耦合电路放大耦合到电力线上。信号受到电力线信道的衰减以及电力线噪声的干扰后,在接收端通过耦合电路强电隔离并接收,再通过 ADC(模数转换),经过数字信号处理,进行电力线信道估计^[12]。

由于国内居民小区一般都采用放射式与树干式相结合的配电方式。因此,电力线网络中存在大量如图2所示的分支结构和阻抗不匹配节点^[13]。正是由于这些阻抗不匹配节点,使得在电力线上进行传输的信号不能从发送节点直接到达接收节点,而是会在各条不同的路径上发生反射和驻波,最终接收节点接收到的信号必然是不同路径上反

射和驻波以后的叠加信号,使得电力线信道呈现多径效应,传输特征会表现出一定的频率选择性衰落。

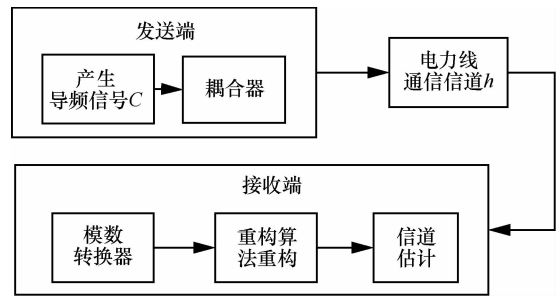


图1 PLC信道估计模型

如图2所示,传输在电力线上的信号除了能够直接由发送节点A到达接收节点D以外,途中还会发生多次反射然后到达接收节点D,形成信号的多径传输。图2中信号可能的传输路径有: A→C→D; A→C→B→C→D; A→C→B→C→B→C→D; A→C→B→C→...→D等。

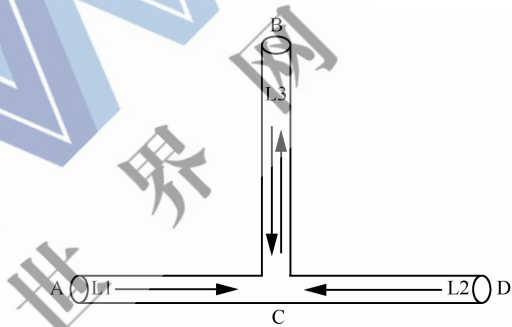


图2 PLC线路分支

若假设电力线多条路径中第*i*条路径的信道传输函数为 $H_i(f)$,则电力线信道的传输函数为:

$$H(f) = \sum_i H_i(f) \quad (1)$$

根据式(1)可知,电力线信道传输特征 $H(f)$ 可以表示为多条路径传输特征的叠加,而根据以上多径传输产生的原因分析,每条路径都存在路径时延且信号随着传输距离和频率的增加而衰减^[14]。

根据式(1)考虑影响每条路径特性的主要参数,从而建立电力线信道模型^[15]:

$$H(f) = \sum_i^N g_i(f) e^{-(\alpha_0 + \alpha_1 f^k) d_i} e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (2)$$

在式(2)中,信道模型参数 α_0 、 α_1 和 k 是通过参考信道的实地测量得出的; $g_i(f)$ 系数在 $(-1,1)$ 中,是各个多径信道的权重;参数 d_i 是每条路径的信道长度,服从 $(0,L)$ 上的均

均匀分布; L 是各个场景下路径长度的上限。电力线信道数学模型表明, 电力线信道是多径信道, 存在频率选择性衰落, 其频率响应函数揭示了电力线信道传输特性的稀疏本质。

3 压缩感知估计信道特性

为了能够更好地了解电力线信道通信环境对 PLC 设备性能的影响, 需要了解电力线的信道特性, 因此必须对 PLC 电力线信道进行准确的信道估计, 得到信道冲击响应的特征参数。

3.1 压缩感知技术

简单来说, 压缩感知的过程分为信号的稀疏化表示、数据压缩过程和压缩数据的恢复重构算法三大部分, 具体过程如图 3 所示。

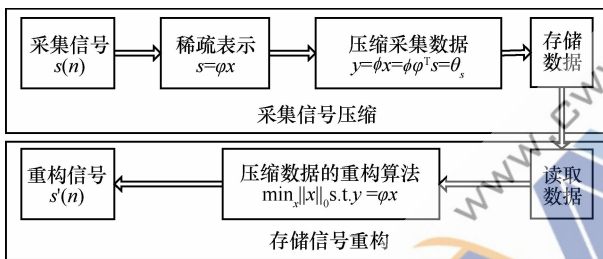


图 3 PLC 压缩感知过程

(1) 信号稀疏表示

如果信号 s 在时域上不具有稀疏性, 可以将其变换到另一个域, 得到稀疏性的投影 x , 从而利用压缩感知技术对变换域上的稀疏信号 x 进行有效压缩处理, 变换域投影过程就是信号的稀疏化表示过程。

$$s = \phi x \quad (3)$$

其中, s 是不具有稀疏性的原始信号; ϕ 是投影矩阵; x 是 s 在投影矩阵 ϕ 上的投影, 即稀疏信号。

(2) 数据压缩

设 $x(n)$ 是由 ADC 采样得到的数字信号, 其维度为 N , 如果该数字信号具有稀疏性, 且稀疏度为 $K(K \ll N)$, 即该信号仅有 K 个元素不为零, 那么该信号就可以利用压缩感知技术, 对原来维度为 N 的信号 $x(n)$ 进行压缩, 降低到 M 维 ($M \ll N$), 得到被压缩的信号 y , 为:

$$y = \phi x = \phi \phi^T s = \theta s \quad (4)$$

其中, y 是被压缩后的信号, ϕ 是合适的观测矩阵, x 是被稀疏化表示的信号, s 为原始待压缩信号。

(3) 压缩数据重构

根据感知少、计算多的原则, 由于压缩感知在硬件前

端完成了数据压缩的过程, 降低了对存储分析部分的要求, 所以硬件后端的压缩数据恢复重构算法成为研究工作的重点。基于以上压缩算法, 被压缩信号的恢复重构可通过式(5)求解最小 0 范数来实现。

$$\min_x \|x\|_0 \quad \text{s.t. } y = \phi x \quad (5)$$

式(5)中, x 是带重构的稀疏信号, y 是经过对 x 的观测后恢复的信号, 0 范数是指 x 中非零元素的个数。

3.2 CS 信道估计运用

传统最小二乘信道估计通过发射与信道冲击响应等长的导频块, 从而将发射信号与信道冲击响应的线性卷积转换为循环卷积, 接收向量可写为:

$$y = p * h + n \quad (6)$$

其中, $*$ 表示循环卷积; p 是发送的导频信号, 式(6)可以进一步写成式(7):

$$y = Ch + n \quad (7)$$

构造合适的导频信号后, 在发射端发射测试导频信号 C , 通过耦合器耦合到电力线上进行传输, 导频信号经过电力线信道传输特性及电力线噪声的影响, 在接收端通过耦合器接收到经过衰减且受到噪声干扰的导频信号。接收端接收信号可以由式(8)表示。

$$\begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_{M-2} \\ y_{M-1} \end{bmatrix}_{M \times 1} = \begin{bmatrix} c_0 & & c_1 \\ c_1 & \ddots & c_2 \\ \vdots & & \vdots \\ c_{M-1} & \ddots & c_M \\ c_M & & c_0 \end{bmatrix}_{M \times N} \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ \vdots \\ h_{N-2} \\ h_{N-1} \end{bmatrix}_{N \times 1} + \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1 \\ \vdots \\ n_{M-2} \\ n_{M-1} \end{bmatrix}_{M \times 1} \quad (8)$$

接收端可利用提取的电力线信道特征 y , 运用正交匹配追踪算法估计电力线信道冲击响应 $h(t)$ 。

OMP 算法是对更早提出的 MP 算法的改进, 相同的是从原子库中选择和观测信号最为匹配的原子。不同的是, OMP 算法需要将已选择的原子进行 Schmidt 正交化处理, 使信号在这些正交原子集上的投影具有正交性, 这种正交性使得 OMP 算法在迭代过程中选择的原子不会重复, 保证了迭代的最优性, 从而减少了迭代次数, 重构效果较好, 应用广泛。

4 仿真结果与分析

基于 MATLAB 仿真平台获得本文使用的电力线信道冲击响应, PLC 信道时频域响应是在 15 条路径, 最长路径为 1 000 m 的条件下生成的信道模型, 并将基于 CS 的电力线信道估计与基于导频序列的最小二乘信道估计在相同条件下进行了对比分析。



参照参考信道参数值,仿真带宽 $B_w=30$ MHz,采样频率 $f_s=60$ MHz,由于实际电力线信道的最大时延不会超过 $10\ \mu\text{s}$,所以采样时间 $t=10\ \mu\text{s}$ 。电力线信道传输特征频域幅频响应如图 4 所示。

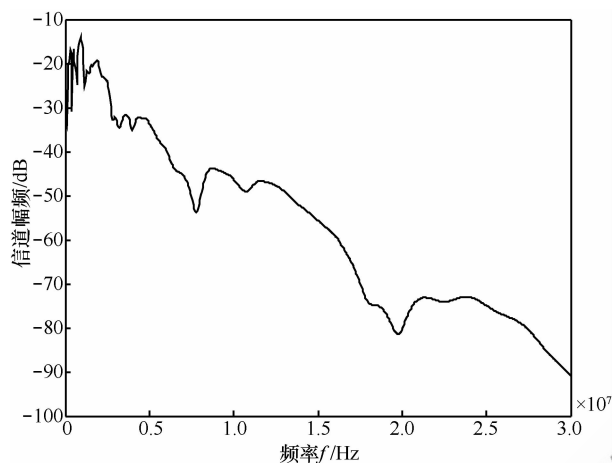


图 4 参考信道幅频响应

(1) 不同信噪比

电力线上的噪声非常复杂,在时域上可以大致分为 5 类:有色背景噪声、窄带噪声、异步于工频的周期性脉冲噪声、同步于工频的周期性脉冲噪声以及突发性脉冲噪声。工程实践中,有色背景噪声、窄带噪声和异步于工频的周期性脉冲噪声的平均功率都较小,这 3 类噪声的时变特性弱,随时间变化缓慢,且存在于整个 PLC 载波通信频带,可将这 3 类噪声归为 1 类,称为背景噪声。同步工频的周期性脉冲噪声和突发性脉冲噪声的平均功率比较大,这两类噪声时间变化剧烈且随机出现,可将其归为 1 类,称为随机脉冲噪声。由于随机脉冲噪声的出现概率很小且该类噪声的出现会对通信质量造成极大影响,导致窄频带通信中断。因此,在 MATLAB 仿真中只考虑信道中持续存在的背景噪声。

(2) 不同压缩维度

基于以上仿真得到的电力线信道冲击响应,构造合适的导频信号矩阵,使接收信号的维度 M 由 50 到 150 逐渐增大, N 为 200,将噪声加入电力线信道,使得信噪比固定为 15 dB 不变。如图 5 所示,基于 CS 的电力线信道估计与传统的最小二乘信道估计相比,在电力线信噪比不变的情况下,随着接收信号维度 M 的不断增大,两种估计方法的估计性能都有所改善,但由于电力线信道本身具有稀疏特性,而基于 CS 的电力线信道估计方法正是利用了电力线

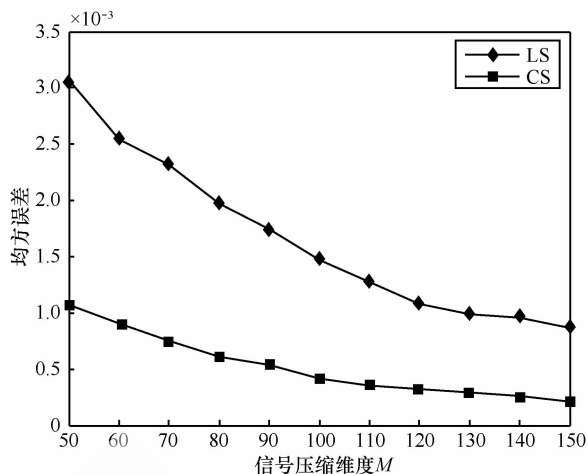


图 5 CS 与 LS 压缩维度性能比较

信道自身稀疏的特性,使得该方法能够更加高效准确地估计电力线信道特性,达到较好的信道恢复重构效果。不过,随着导频序列的不断增长,基于导频信号的最小二乘信道估计方法也能达到很好的信道估计效果,但比较而言,基于压缩感知的电力线信道估计算法更具优势,且达到了压缩数据量的目的。

5 结束语

本文首先分析了电力线通信信道具备稀疏性,在此基础上提出了一种基于压缩感知的电力线信道估计方法。仿真结果表明,基于 CS 的电力线信道估计方法使用了更少的导频信号和存储资源,但算法性能却优于最小二乘信道估计算法,因此本文提出的算法具备更好的应用前景。

参考文献:

- [1] 张银昌. 基于电力线载波与无线网络结合的通讯技术在用电信息采集系统的应用研究 [J]. 新疆电力技术, 2015(1): 65-67.
ZHANG Y C. The communication technology in information acquisition system based on power line carrier and wireless network. [J]. Xinjiang Electric Power Technology, 2015 (1): 65-67.
- [2] 张捷. 低压电力线载波通信信道特性研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
ZHANG J. Research on channel characteristics of low voltage power line carrier communication [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [3] 黄鹏飞, 谢涛, 刘爱莲, 等. 典型通信频率的低压电力线通信噪声特性研究[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2014(2): 53-57.

- HUANG P F, XIE T, LIU A L, et al. Research on the noise characteristics of typical communication frequency in low-voltage power line communication [J]. Journal of Zhengzhou University of Light Industry (Natural Science Edition), 2014(2): 53-57.
- [4] 许盛, 易浩勇, 汪晓岩. 中压电力线信道性能的自动测量技术[J]. 电力系统通信, 2010, 31(1): 52-54.
- XU S, YI H Y, WANG X Y. Automatic measurement technology of medium voltage power line channel [J]. Telecommunications for Electronic Power System, 2010, 31(1): 52-54.
- [5] COPE L D, MOLLENKOPF J D, KLINE P A, et al. Power line communication apparatus and method of using the same: US 7245212 B2[P]. 2007-12-11.
- [6] LIU S, GOU B, LI H, et al. Power-line communication channel characteristics under transient model [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1701-1708.
- [7] 张轩. 低压电力线正交频分复用系统信道估计技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- ZHANG X. Channel estimation of orthogonal frequency division multiplexing system for low voltage power line [D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2015.
- [8] 杨延辉. 电力线 OFDM 系统信道估计技术研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- YANG Y H. Research on channel estimation based on OFDM of low-voltage power line [D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2015.
- [9] 葛进波. 基于压缩感知的重构算法与应用研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- GE J B. Research on reconstruction algorithms and application based on compressed sensing [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [10] TROPP J A, GILBERT A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit: the Gaussian case[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 53(12): 4655-4666.
- [11] TRALIC D, GRGIC S. Signal reconstruction via compressive sensing [C]//ELMAR 2011, Sept 14-16, 2011, Zadar, Croatia. New Jersey: IEEE Press, 2011: 5-9.
- [12] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理(第7版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- FAN C X, CAO L N. Communication theory[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012.
- [13] ZIMMERMANN M, DOSTERT K. A multipath model for the powerline channel [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(4): 553-559.
- [14] 马强, 陈启美, 李勃, 等. 跻身未来的电力线通信(二)电力线信道分析及模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 72-76.
- MA Q, CHEN Q M, LI B, et al. Predictive schemes for future power line communication part two PLC channel analysis and model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 72-76.
- [15] 郭昊坤, 衡思坤, 应展烽, 等. 低压电力线通信信道特性研究综述[J]. 电力系统通信, 2012, 33(4): 1-5.
- GUO H K, HENG S K, YING Z F. Survey of the characteristics of low-voltage power line communication channel [J]. Telecommunications for Electric Power System, 2012, 33(4): 1-5.
- [16] 赖征田. 电力线载波信道特性研究及仿真[J]. 电力系统通信, 2010, 31(216): 39-42.
- LAI Z T. Channel characteristics analysis and simulation of power line carrier communication system[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2010, 31(216): 39-42.
- [17] REUVEN I. Power line communication method and apparatus: EP2453583A2[P]. 2014-04-24.

[作者简介]



何业慎(1979-),男,深圳市国电科技通信有限公司高级工程师,主要研究方向为电力通信技术、计算机软件系统、信息安全技术、安全质量管理与企业管理科学。



梁琨(1982-),女,天津科技大学计算机科学与信息工程学院讲师,主要研究方向为物联网、智能电网、信息通信、信息安全等。