



基于硬阈值迭代的电力线载波通信脉冲噪声抑制方法

余明宸,李有明,付彩梅,周桂莉

(宁波大学信息科学与工程学院,浙江 宁波 315211)

摘要:在电力线载波通信系统中,由于脉冲噪声的存在,系统性能会受到严重影响。考虑到脉冲噪声在时域上具有稀疏性,基于压缩感知的脉冲噪声估计方法被广泛采用。提出了一种基于硬阈值迭代的压缩感知方法来估计脉冲噪声。该方法通过迭代求解更新阈值,然后利用阈值函数对脉冲噪声进行估计,最后在接收信号中减去脉冲噪声的估计值,完成对脉冲噪声的抑制。仿真结果表明,该方法能够准确估计脉冲噪声幅值点,同时在均方误差与估计信噪比的性能上都有提高。

关键词:电力线通信;脉冲噪声;压缩感知;硬阈值迭代

中图分类号: TN913

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016277

Iterative hard thresholding based impulsive noise suppression method in power line communication system

YU Mingchen, LI Youming, FU Caimei, ZHOU Guili

College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China

Abstract: The performance of power line communication systems is seriously affected by impulsive noise. The compressed sensing theory has been applied for estimation in view of the sparse property of impulsive noise in the time domain. A compressed sensing method based on the iterative hard thresholding was proposed to estimate the impulsive noise. Firstly, the thresholding value was updated by iteration, and then the thresholding function was used to estimate the impulsive noise. Finally, the impulsive noise was cancelled by subtracting the estimation value from the received signal. Simulation results show that the proposed method can efficiently estimate the impulsive noise and promote the performance both in mean square error and signal to noise ratio.

Key words: power line communication, impulsive noise, compressed sensing, iterative hard thresholding

1 引言

PLC(power line communication,电力线通信)是一种利用电力线介质进行数据传输的通信方式^[1]。电力线作为已经完善搭建的基础设施,使用其进行数据传输可以大大降

低通信成本。现有的典型 PLC 系统应用包括:远程抄表、实时报价以及智能能源管理等。而在未来的应用中,包括慢扫描的电视图像、视频以及音频信号,均可以借助电力线网络进行传输^[2]。但是,由于电力线设计之初是用来传输电能的,在线路上电压高、噪声大、负载种类复杂,因此实

收稿日期:2016-05-26;修回日期:2016-10-12

通信作者:李有明,liyoming@nbu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61571250);宁波市自然科学基金资助项目(No.2015A610121)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61571250), Ningbo Natural Science Foundation of China (No.2015 A610121)



现新业务对设备的抗干扰性和稳定性提出了更高的要求[3]。在 PLC 系统的众多干扰中,噪声的影响最为明显。普遍认为 PLC 系统中的噪声可分为 5 类:有色背景噪声、窄带噪声、与主频同步的周期脉冲噪声、与主频异步的周期脉冲噪声以及非周期的异步脉冲噪声。而脉冲噪声的功率谱密度要比背景噪声功率谱密度高出 10~15 dB,有时甚至可以达到 50 dB,因而脉冲噪声是影响电力线通信系统性能的主要因素[4,5]。在 PLC 通信系统中,其拓扑结构与传统不同,因此造成信道特性复杂,多径效应明显。为了对抗多径效应,多载波 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing, 正交频分复用)技术在 PLC 中被广泛采用[6,7]。相较于单载波系统,多载波 OFDM 系统利用 CP(cyclic prefix, 循环前缀)对抗多径效应,克服了码间干扰;同时将脉冲噪声的能量分散到大量的子载波中,减弱了脉冲噪声的影响[6]。但是,当脉冲噪声的能量超过某个门限值时,例如比背景噪声高 10~20 dB,传统的 OFDM 接收机性能会急剧恶化,因此必须采取相应的技术抑制脉冲噪声[8]。

常见的脉冲噪声抑制方法包括限幅法、消隐法和联合消隐限幅法。这类方法的基本原理是设定一个门限值来判断接收到的采样信号是否被脉冲噪声严重干扰,如果被干扰则将该信号置为 0 或将信号幅值限制为门限值[9]。但是,这种方法需要设置系统参数,较小或较大的门限值都会导致脉冲噪声抑制性能严重下降。考虑到 PLC 系统中脉冲噪声的发生概率很低,其在时域上可以视为稀疏信号[10],因此可以使用基于压缩感知理论的信号估计算法对脉冲噪声信号进行估计和消除。通常的做法是首先利用 PLC 系统中的空子载波构建信号压缩感知模型,将接收到的信号投影到空子载波上,接下来基于信号的统计特性,采用合适的算法估计脉冲噪声信号,最后在接收到的信号中减去脉冲噪声估计值,完成对脉冲噪声的抑制。常用的压缩感知信号重构算法包括软阈值迭代^[11]和 OMP(orthogonal

matching pursuit, 正交匹配追踪)^[12],这些算法通过迭代求解原问题的稀疏解,从而得到脉冲噪声的估计值。参考文献[13]通过求解脉冲噪声的 L_0 范数最小化问题对脉冲噪声进行估计。但是,直接求解 L_0 范数最小化是 NP 难问题,参考文献[14]提出将原问题松弛成一个凸问题,即利用分块稀疏的特性,求解脉冲噪声 L_1 范数最小化问题,对脉冲噪声进行估计。但是这种方法对脉冲噪声幅值点的估计不够准确。为了提高估计的准确性,参考文献[15]通过求解脉冲噪声的光滑 L_0 范数最小化问题对脉冲噪声进行估计。该方法克服了直接求解 L_0 范数的 NP 难问题,并且在估计性能上有所提高。但是,由于该方法采用连续函数进行近似,因此在非脉冲噪声采样点处具有估计误差。

为了解决上述方法存在的问题,本文提出使用硬阈值迭代的方法对脉冲噪声进行估计。该方法首先通过 L_0 范数建立估计 PLC 系统中的脉冲噪声的优化问题,并通过引入正则化参数将原问题转化成正则化问题,在此基础上通过硬阈值迭代算法对该问题进行求解,从而估计出脉冲噪声。仿真结果表明,相比于其他压缩感知方法,本文方法在均方误差和估计信噪比上具有优势。同时,当空子载波个数和脉冲噪声个数增加时,本文方法的性能提升效果明显。

2 系统模型

本文基于 OFDM 调制的基带 PLC 系统传输,其相应模块如图 1 所示。

首先,在发送端发出的初始二进制数据序列 $b_{N \times 1}$ 被编译为定长码字 $c_{N \times 1}$ 。该码字通过 QPSK (quadrature phase shift keying, 正交相移键控)映射为一个 OFDM 符号,这里假定一个 OFDM 符号中全部子载波数为 N ,并且分别包括 K 个数据子载波和 $N-K$ 个空子载波。通过 QPSK 映射的数据向量 $T=[T_1, T_2, \dots, T_N]^T$ 经过 IDFT (inverse discrete Fourier transform, 离散傅里叶逆变换)模块转换为时域信号 $t=[t_1, t_2,$

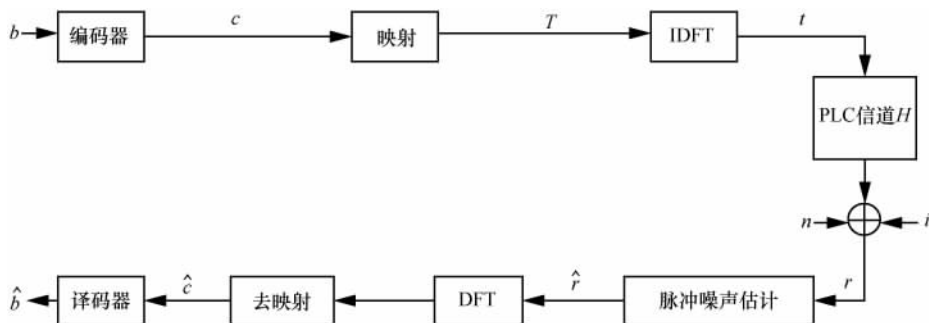


图 1 电力线系统模型

$\dots, t_N]^T = F^H T$, 这里矩阵 F 是 N 点的 DFT (discrete Fourier transform, 离散傅里叶变换) 范德蒙德矩阵, 而 F^H 是矩阵 F 的厄米特变换。在时域信号 t 的头部加上用于防止符号间干扰的 CP 之后传输到 PLC 信道, 同时假定 CP 的长度大于信道延迟扩展的长度。在接收端, 信号经过信道并去掉 CP 之后为:

$$r = Ht + i + n \quad (1)$$

其中, H 是一个 $N \times N$ 的信道循环卷积矩阵, 矩阵的第一行元素为归一化的离散时间信道脉冲响应。 n 是具有方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声信号。 i 是服从伯努利高斯分布的脉冲噪声信号, 其具体形式如下:

$$i = B \circ G \quad (2)$$

其中, “ $\circ$ ” 是阿达玛运算符, 定义了两个矩阵对应元素的乘积。 B 是二进制伯努利序列, 其出现 1 的概率为 p , 出现 0 的概率为 $1-p$ 。 G 是服从高斯分布的随机变量, 其均值为 m , 方差为 σ_g^2 。

在接收端的脉冲噪声估计模块部分, 构造一个 $(N-K) \times N$ 的空子载波矩阵 Φ , 其 $N-K$ 行对应原 OFDM 符号中的 $N-K$ 个空子载波序列且 $\|\Phi\|_2 = 1$ 。由 OFDM 符号的各个子载波之间的正交性可知, 在式 (1) 的两边同时乘以空子载波矩阵 Φ , 得到:

$$y = \Phi r = \Phi H t + \Phi i + \Phi n = \Phi i + \Phi n \quad (3)$$

其中, 由于 Φn 和 n 具有相同的均值和方差, 所以 Φn 也服从相同的高斯分布。而由先验信息可知, 脉冲噪声 i 在时域具有稀疏性, 所以可以构造问题如下:

$$\begin{aligned} \hat{i}_p &= \arg \min_i \|i\|_0 \\ \text{s.t. } &\|y - \Phi i\|_2 \leq \varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\|i\|_0$ 是脉冲噪声 i 的范数 L_0 , $\| \cdot \|_2$ 表示向量的 L_2 范数, ε 是与加性噪声 n 的方差相关的某个正数。通过对该最小化问题的求解, 得到脉冲噪声的估计值 $\hat{i}_p$ 。在接收到的信号 r 中减去脉冲噪声的估计值 $\hat{i}_p$, 即可得到脉冲噪声抑制后的接收信号 $\hat{t}$ 。

最后, 信号 $\hat{t}$ 依次经过 DFT 模块、去映射模块和译码器, 得到译码后的信号 $\hat{b}$, 完成 PLC 系统的数据传输。

3 脉冲噪声估计算法

3.1 算法推导

由于式 (4) 所示的问题是一个 NP 难问题, 为了求解

该问题, 利用正则化方法构造如下问题^[16]:

$$\hat{i}_p = \arg \min_i \|y - \Phi i\|_2^2 + \lambda \|i\|_0 \quad (5)$$

其中, λ 为正则化参数。

对于含 L_0 范数的问题 (5) 直接求解有困难。为此使用参考文献 [17] 提出的 MM (majorize minimize, 最小化优化函数) 迭代算法进行求解。首先构造含两步迭代结果的优化问题如下:

$$\begin{aligned} i_{j+1} &= \arg \min_{i_{j+1}} \|y - \Phi i_{j+1}\|_2^2 + \lambda \|i_{j+1}\|_0 - \\ &\quad \|\Phi i_{j+1} - \Phi i_j\|_2^2 + \|i_{j+1} - i_j\|_2^2 \end{aligned} \quad (6)$$

其中, i_j 和 i_{j+1} 分别表示脉冲噪声当前和下一次的迭代求解值。

通过求解优化问题 (6), 得到脉冲噪声迭代求解表达式为:

$$i_{j+1} = i_j + \Phi^H (y - \Phi i_j) \quad (7)$$

记仿射函数 $B(i) = i + \Phi^H (y - \Phi i)$ 。考虑到脉冲噪声具有较高的幅度值, 因此可以利用阈值函数 $H(\cdot)$ 对 $B(i)$ 进行判决。定义硬阈值函数 $H(B(i))$ 表示如下^[18]:

$$H(B(i)) = \begin{cases} 0, & |B(i)| \leq \lambda^{0.5} \\ B(i), & |B(i)| > \lambda^{0.5} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\lambda^{0.5}$ 表示硬阈值函数的门限值, 其与正则化参数 λ 有关。

通常情况下, 正则化参数 λ 可以通过交叉验证的方法进行求解。但是在已知问题稀疏度的情况下, 根据参考文献 [19] 所提方法, 该参数 λ 有如下显式表示:

$$\lambda = \frac{\sqrt{96}}{9} |[B(i)]_{s+1}|^2 \quad (9)$$

其中, s 表示问题稀疏度, $[B(i)]_{s+1}$ 表示对 $B(i)$ 中的各个元素进行降序排序后的第 $s+1$ 个值。

最后, 得到脉冲噪声估计的迭代求解表达式为:

$$\hat{i}_{j+1} = H(B(\hat{i}_j)) \quad (10)$$

其中, $\hat{i}_{j+1}$ 和 $\hat{i}_j$ 分别表示第 $j+1$ 次和第 j 次求解后脉冲噪声的估计值。

利用式 (10) 进行迭代求解, 当残差满足设定的判决阈值时, 即可输出脉冲噪声的估计值 $\hat{i}_p$ 。

3.2 算法流程

由第 3.1 节可知, 对于式 (4) 中的脉冲噪声的估计问题可以先转化为一个 L_0 范数型目标函数的最小值正则化问题, 然后求解硬阈值函数, 最后通过迭代求解, 得到脉冲



噪声的估计值。该算法可以描述如下。

输入信息:观测值 y , 观测矩阵 Φ , 判决阈值 ς 。

输出信息:脉冲噪声的估计值 $\hat{i}_p$ 。

实现流程如下所示。

初始化迭代初值 $\hat{i}_0 = \Phi^+ y$, 其中 Φ^+ 为 Φ 的伪逆矩阵, 并令初始迭代次数 $iteN=0$;

(1) 将当前迭代结果代入, 计算仿射函数 $B(\hat{i}_{iteN})$, 并按降序进行排列;

(2) 根据式(9), 计算硬阈值函数门限值;

(3) 利用硬阈值函数进行迭代求解, 得到脉冲噪声的估计值 $\hat{i}_{iteN+1}$;

(4) 若 $\frac{\|\hat{i}_{iteN+1} - \hat{i}_{iteN}\|_2}{\|\hat{i}_{iteN}\|_2} < \varsigma$, 则进入第 5 步; 否则, $iteN = iteN+1$, 并返回第 1 步;

(5) 输出脉冲噪声的估计值 $\hat{i}_p = \hat{i}_{iteN+1}$ 。

该算法可用如图 2 所示的算法流程表示。

4 仿真结果与分析

分别比较了已有的基于压缩感知的 4 种脉冲噪声估计方法与本文方法的性能。这 4 种方法分别为软阈值方法^[11]、正交匹配追踪方法^[12]、 L_1 范数方法^[14]和光滑 L_0 范数方法^[15]。仿真采用了 QPSK 调制的 OFDM 系统, 表 1 中列出了仿真的设置参数和 PRIME 标准参数^[12]。考虑实际系统中脉冲噪声的发生概率, 令仿真过程中随机产生的脉冲噪声个数为 6, 并设定 INR (interference to noise ratio, 脉冲噪声与背景噪声的功率比) 为 35 dB, SNR (signal to noise ratio, 信号与背景噪声功率比) 为 25 dB, 判决阈值 $\varsigma = 10^{-5}$ 。所有统计结果通过 1 000 次蒙特卡洛实验求平均得到。为了比较不同脉冲噪声个数和空子载波个数对脉冲噪声估计的影响, 定义两个性能参数均方误差 (MSE) 和估计信噪比 (ξ) 如下:

表 1 仿真设计和 PRIME 标准的相关参数设置

相关参数	仿真设置	PRIME
调制方式	QPSK	QPSK
子载波总数/个	256	256
数据子载波数/个	136	98
空子载波数/个	120	158

$$MSE = \|\hat{i} - \hat{i}_p\|_2 \quad (11)$$

$$\xi(dB) = 20 \lg(\|\hat{i}\|_2 / \|\hat{i} - \hat{i}_p\|_2) \quad (12)$$

图 3 表示不同方法在不同采样点处脉冲噪声幅度值的估计值, 为了便于比较, 也同时列出了脉冲噪声幅度值的原始值。在本组实验中, 同时清楚列出 5 种方法的仿真结果有困难, 这里仅比较了光滑 L_0 范数方法、 L_1 范数方法与本文方法。由图 3 可知, 在脉冲噪声采样点处, 本文方法与光滑 L_0 范数方法具有相似估计精确度, 均可以估计出实际脉冲噪声幅度值, 而相较于以上两种方法, L_1 范数方法估计精确度较低。在非脉冲噪声采样点处, 光滑 L_0 范数方法估计误差大于本文方法, 因此本文方法比光滑 L_0 范数方法估计得更加准确。

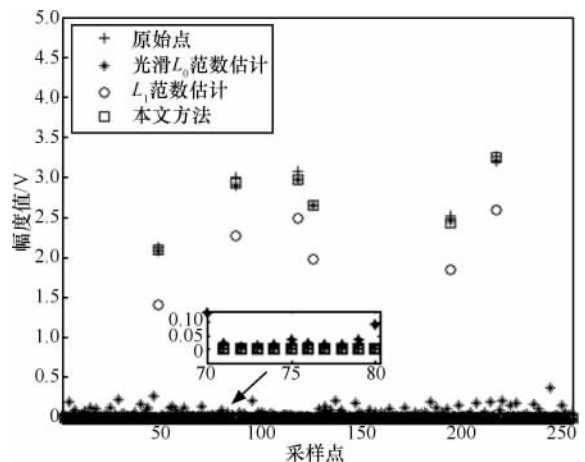


图 3 3 种方法对于脉冲噪声幅值点的估计

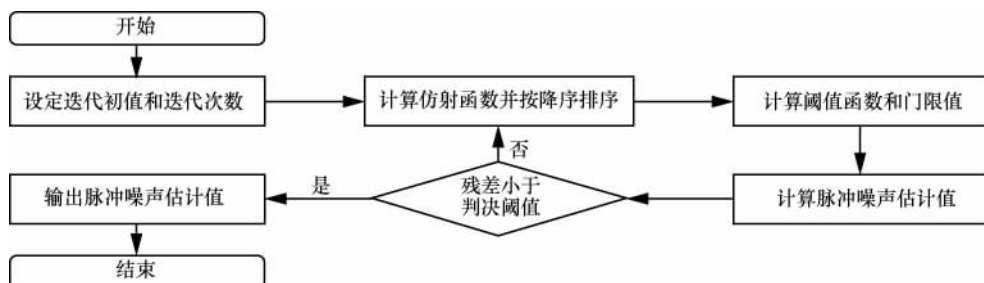


图 2 算法流程

图 4 表示均方误差随空子载波个数的变化曲线。从中看出,随着空子载波个数的增加,5 种方法的均方误差均呈下降趋势,是因为空子载波个数的增加使系统获得了更多的观测值,因而可以更好地估计脉冲噪声。当空子载波个数较小时,本文方法和软阈值方法的均方误差接近,这是由于空载波数小时,可有效利用的观测值少,原问题接近病态问题,正则化方法能将病态问题转化为稳态问题^[18],因而本文方法在此情况下具有较好的估计精度。当空子载波个数较大时,本文方法的均方误差性能表现明显优于其他方法。特别的,当空子载波个数大于 180 时,本文方法对于估计均方误差这一性能有了更大的提升。

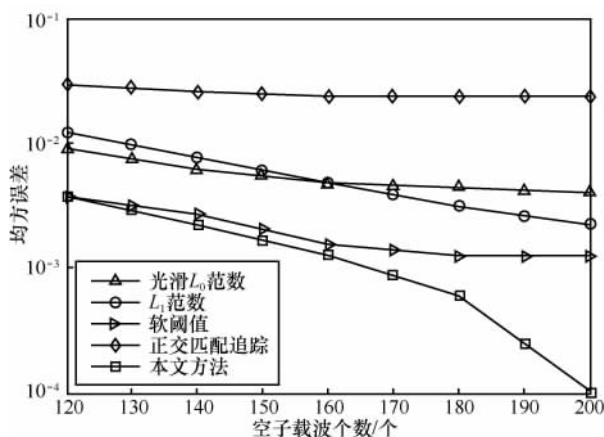


图 4 不同空子载波个数下的均方误差

图 5 表示估计信噪比随空子载波个数的变化曲线。分析此结果发现,随着空子载波个数的增加,5 种方法的估计信噪比均呈上升趋势。本文方法在不同空子载波个数下均具有较高的估计信噪比,并且随着空子载波个数的增加,本文方法在估计信噪比上的提升要优于其他方法,特

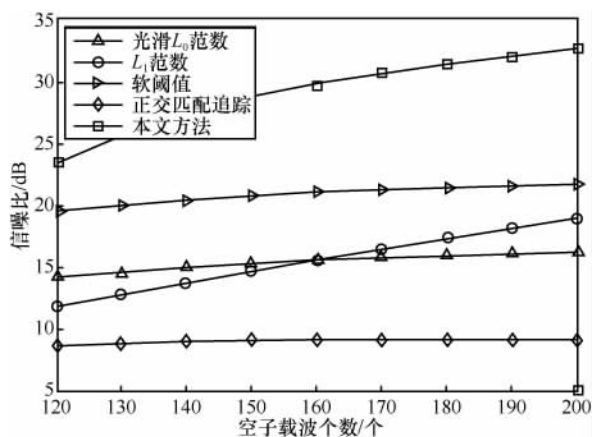


图 5 不同空子载波个数下的估计信噪比

别是当空子载波个数为 200 时,本文方法相较于性能次优的软阈值方法,在估计信噪比上提高了约 11 dB。

图 6 表示均方误差随脉冲噪声个数的变化曲线。由图 6 可知,随着脉冲噪声个数的增加,五种方法的均方误差均呈上升趋势。当脉冲噪声个数为 3 时,本文方法与软阈值方法具有相近的均方误差;当脉冲噪声个数增大时,光滑 L_0 范数方法、 L_1 范数方法和软阈值方法的均方误差逐渐增大且接近,而本文方法仍然具有较小的均方误差。

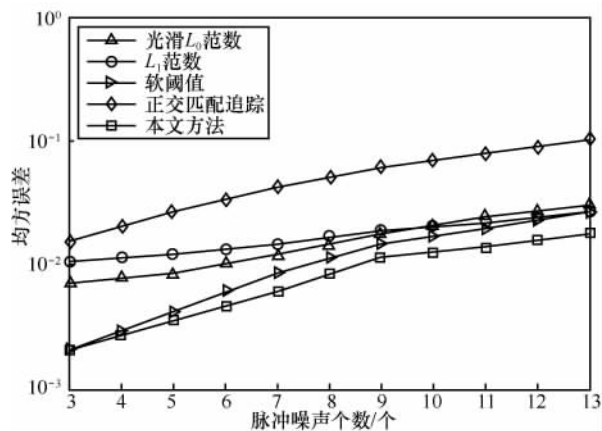


图 6 不同脉冲噪声个数下的均方误差

上述仿真结果表明,无论是在不同空子载波个数还是不同脉冲噪声个数下,本文方法在估计均方误差和接收端估计信噪比方面的性能均优于已有的方法。

5 结束语

依据脉冲噪声的时域稀疏特性,提出基于硬阈值迭代的脉冲噪声估计方法,并应用于 PLC 系统中的脉冲噪声估计和抑制。与其他基于压缩感知的脉冲噪声估计方法相比,本文方法在脉冲噪声幅值点估计的准确度上有较大提升。另外,还比较了多种方法的估计性能随空子载波个数和脉冲噪声个数的变化情况。仿真结果表明,本文方法在均方误差和估计信噪比的性能上优于其他方法。但是本文方法由于采用迭代方式进行求解,因此具有较高的计算复杂度,运算时间较长。下一步的工作是在保证噪声估计性能的前提下,研究低复杂度的脉冲噪声抑制方法。

参考文献:

- [1] YOON S G, JANG S, KIM Y H, et al. Opportunistic routing for smart grid with power line communication access networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 303-311.



- [2] FERREIRA H C, LAMPE L, NEWBURY J, et al. Power line communication-theory and applications for narrowband and broadband communications over power lines[M]. Beijing: Press of China Electric Power, 2014: 55-59.
- [3] NASSAR M, LIN J, MORTAZAVI Y, et al. Local utility power line communications in the 3–500 kHz band: channel impairments, noise, and standards[J]. Optics Express, 2012, 29(5): 116-127.
- [4] 张强. 宽带电力线通信中脉冲噪声消除算法及其 VLSI 实现[D]. 上海: 复旦大学, 2013.
ZHANG Q. The mitigation algorithm of impulsive noise in broadband powerline communication system and its VLSI implementation[D]. Shanghai: Fudan University, 2013.
- [5] NASSAR M, GULATI K, MORTAZAVI Y, et al. Statistical modeling of asynchronous impulsive noise in powerline communication networks [C]//Global Telecommunications Conference, December 5–9, 2011, Houston, TX, USA. New Jersey: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [6] RABIE K M, ALSUSA E. MC-CDMA transmission with blanking nonlinearity for impulsive noise power-line communication channels [C]//IEEE Vehicular Technology Conference, May 11–14, 2015. Glasgow, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [7] LIN J, PANDE T, KIM I H, et al. Time-frequency modulation diversity to combat periodic impulsive noise in narrowband powerline communications [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(5): 1-10.
- [8] RABIE K M, ALSUSA E. Performance analysis of adaptive hybrid nonlinear preprocessors for impulsive noise mitigation over power-line channels [C]//IEEE International Conference on Communications, June 8–12, 2015, London, UK. New Jersey: IEEE Press, 2015: 728-733.
- [9] ZHIDKOV S V. Analysis and comparison of several simple impulsive noise mitigation schemes for OFDM receivers[J]. IEEE Transactions on Communications, 2008, 56(1): 5-9.
- [10] LIN J, NASSAR M, EVANS B L. Non-parametric impulsive noise mitigation in OFDM systems using sparse bayesian learning[C]//Global Telecommunications Conference, December 5–9, 2011, Houston, TX, USA. New Jersey: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [11] DAUBECHIES I, DEFRISE M, MOL C D. An iterative thresholding algorithm for linear inverse problems with a sparsity constraint [J]. Communications on Pure & Applied Mathematics, 2003, 57(11): 1413-1457.
- [12] THEIS F J, JUNG A, PUNTONET C G, et al. Signal recovery from partial information via orthogonal matching pursuit[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(12): 4655-4666.
- [13] ALNAFFOURI T Y, QUADEER A A, CAIRE G. Impulse noise estimation and removal for OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(3): 976-989.
- [14] LAMPE L. Bursty impulse noise detection by compressed sensing[C]//IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, April 3–6, 2011, Udine, USA. New Jersey: IEEE Press, 2011: 29-34.
- [15] JUWONO F H, GUO Q, HUANG D, et al. Impulsive noise detection in PLC with smoothed L0-norm [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, April 19–24, 2015, South Brisbane, QLD, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: 3232-3236.
- [16] OLLILA E, HYON-JUNG KIM, KOIVUNEN V. Robust iterative hard thresholding for compressed sensing [C]//IEEE International Symposium on Communications, Control and Signal Processing, May 21–23, 2014, Athens, Hellenic Republic. New Jersey: IEEE Press, 2014: 226-229.
- [17] HUNTER D R, LANGE K. A tutorial on MM algorithms [J]. American Statistician, 2010, 58(1): 30-37.
- [18] BLUMENSATH T, DAVIES M E. Iterative thresholding for sparse approximations [J]. Journal of Fourier Analysis & Applications, 2008, 14(5): 629-654.
- [19] XU Z, CHANG X, XU F, et al. L1/2 regularization: a thresholding representation theory and a fast solver [J]. IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems, 2012, 23(7): 1013-27.

[作者简介]



余明宸(1991–),男,宁波大学硕士生,主要研究方向为电力线通信系统脉冲干扰。



李有明(1963–),男,宁波大学通信技术研究所教授、博士生导师,主要研究方向为宽带通信、电力线通信、协作中继、认知无线电等。

付彩梅(1990–),女,宁波大学硕士生,主要研究方向为认知无线电中的频谱检测技术。

周桂莉(1992–),女,宁波大学硕士生,主要研究方向为水声通信系统中资源分配和干扰抑制。