

基于时频峰值滤波的电力线通信噪声消除方法

苏岭东¹, 翟明岳¹, 何欣²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 长安大学理学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 为了克服电力线通信系统(PLC)中存在的大量噪声, 改善低信噪比情况下电力线通信系统通信质量, 提高电力线通信系统可靠性, 引入时频峰值滤波(TFPF)算法作为电力线通信系统的噪声消除技术。时频峰值滤波算法通过频率调制将电力线含噪信号调制成解析信号的瞬时频率, 利用解析信号的Wigner-Ville分布的峰值进行瞬时频率估计, 从而恢复有效信号。针对电力线通信系统信号的非线性特性, 利用加窗的Wigner-Ville分布实现TFPF。实验证明, 在低信噪比情况下, 该方法可以有效地消除电力线通信系统噪声, 降低误码率(BER), 提高通信质量。

关键词: 电力线通信; 低信噪比; 噪声消除; Wigner-Ville分布; 时频峰值滤波

A new noise mitigation method based on time frequency peak filtering in powerline communication system

SU Lingdong¹, ZHAI Mingyue¹, HE Xin²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. College of Science, Changan University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to overcome the impact of different types of noises in the power line communication system (PLC), moreover, improve the low signal to noise ratio (SNR) situation and the reliability of the communication system, this paper presents a noise mitigation method based on time-frequency peak filtering (TFPF). TFPF is the technique that encodes the signal as instantaneous frequency (IF) of an analytic signal by frequency modulated. Then, the signal is recovered by getting peak of WVD of analytic signal according to frequency. For the nonlinearity of the power line communication system data, the WVD added window function is utilized to execute TFPF. Numerical experiments have shown that the TFPF method can effectively eliminate the power line communication system noise, reduce the Bit Error Rate (BER) and improve the quality of communication system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60972004).

Key words: power line communication system; low SNR; noise mitigation; WVD; time frequency peak filter

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)01-0015-06

0 引言

由于电力线覆盖范围广, 不需重新铺设, 利用现有电力线进行通信, 能够减少投资和对线路的维护成本, 因此如何借助于电力线载波通信技术实现电力线可靠通信, 成为了国内外技术人员技术攻关的一个重要目标^[1]。然而, 电力线并不是专门为通信所设计, 存在很多不利于通信的因素^[2-3]。信号的多径传输和频率选择性衰落; 信号时变性和时间选择性衰落; 信号的非线性和非平稳性, 都严重影响着电力线通信系统通信质量。而且, 更重要的是, 在电力线通信系统中, 由于发射端和接收端之间存在

大量的分支和电力设备, 导致电力线信道中存在大量的噪声。这些噪声严重影响通信系统的可靠性, 导致通信质量严重降低。

为了提高电力线通信系统通信质量, 已经有大量的国内外学者对电力线信道噪声及噪声消除技术进行研究。目前, 国内外对电力线通信信道噪声研究主要集中在以下两个方面: 一方面是研究电力线通信系统噪声特征, 建立噪声模型, 并基于模型研究噪声对电力线通信系统影响^[4-6]。另一方面是基于电力线噪声模型, 研究电力线通信信号噪声消除方法^[7-8]。虽然研究电力线通信系统噪声, 对提高电力线通信质量有一定帮助, 但是, 在某些特殊情况, 信号将会淹没在大量噪声中, 导致电力线通信系统低信噪比情况, 严重影响通信系统通信质量。因此,

基金项目: 国家自然科学基金项目(60972004)

有必要研究在低噪声情况下的噪声消除技术。本文研究一种基于时频峰值滤波算法的电力线通信信号增强技术。在低信噪比情况下, 时频峰值滤波可以有效实现噪声消除^[9]。并被广泛应用于地震探测, 信号处理等领域^[10-11]。时频峰值滤波算法是一种基于瞬时频率估计的信号增强方法, 通过频率调制将含噪声的信号编码为频率调制解析信号的瞬时频率, 利用其时频分布沿着瞬时频率集中的特性, 将频率调制的解析信号的时频分布的峰值作为瞬时频率估计, 从而消除随机噪声。仿真实验证明, 时频峰值滤波算法可以有效地实现电力线通信信号增强, 改善电力线通信系统通信质量。

1 时频峰值滤波算法

因为低信噪比情况存在于电力线通信系统中, 因此在电力线通信系统中, 需要采用噪声消除和信号增强技术。实际上, 不论何种通信系统, 信号都始终受到噪声影响。传统通信系统中对噪声消除技术研究多年, 产生了最小均方误差算法, 递归均方误差算法和卡尔曼滤波算法等噪声消除技术, 但是许多噪声消除和信号增强技术都只能在高信噪比情况下得到满意结果。当信噪比低于某一阈值时, 则不能良好工作。目前, 基于瞬时频率估计的时频峰值滤波技术被认为是一种低信噪比情况下的信号增强技术。研究表明, 即使在信噪比为-9 dB 情况下, TFPF 算法依然有效^[9]。而且, TFPF 已经被广泛地应用于地震信号恢复等领域。

1.1 瞬时频率估计

时频峰值滤波技术是在瞬时频率估计的基础上完成的, 通过频率调制将含噪声信号编码为频率调制的解析信号的瞬时频率, 利用瞬时频率估计完成对信号的估计。信号的瞬时频率反映了信号频谱的谱峰位置随时间变化的情况, 同时也反映了信号的能量在时间频率平面上集中的情况。因此, 瞬时频率是研究非平稳信号的一个重要参数, 也是时频峰值滤波中的重要概念。

复信号或解析信号 $z(t)$ 总是可以表示为 $z(t) = a(t)e^{j2\pi\phi(t)}$, 其中 $a(t)$ 为瞬时幅度, $\phi(t)$ 为瞬时相位, 则 $z(t)$ 的瞬时频率定义为

$$f_z(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (1)$$

因此, 另一方面, 信号 $z(t)$ 则可以写成

$$z(t) = a(t)e^{j2\pi \int_{-\infty}^t f_z(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

目前, 现有的瞬时频率估计方法针对瞬时频率不同的特性而不同, 主要有直接法、过零检测法、

相位建模法和基于时频分布的方法等。目前, 对于瞬时频率估计多数采用基于时频分布的方法。

应用时频分布来估计瞬时频率明显优于非时频方法, 这是因为在时频平面上不仅可以采用预处理方式减小噪声对瞬时频率估计的影响, 降低对信噪比的要求, 而且对多分量信号, 可以在时频平面上明显分开, 从而估计各组成分量的瞬时频率。而在非时频方法, 无法做到这些, 因此本文也采用基于时频分布估计瞬时频率的方法。对于仅有频率调制或小幅度调制的信号, 特别是线性调频信号, Wigner-Ville 分布(WVD)的信号能量沿瞬时频率最为集中, 因此, 通过对 Wigner-Ville 分布峰值的估计就可以得到信号的瞬时频率。但是, 对于解析信号的瞬时频率是非线性的, 利用 WVD 的峰值的瞬时频率估计会引起偏差, 在这种情况下, 可以采用加窗的 WVD, 即伪 Wigner-Ville(PWVD)进行频率估计。复信号或解析信号的伪 WVD 为

$$W_z(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) z^*(t - \frac{\tau}{2}) z(t + \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (3)$$

式中, $h(\tau)$ 是窗函数。则瞬时频率估计就是 PWVD 在频率上的峰值, 即

$$f(t) = \arg \max_f (W_z(t, f)) \quad (4)$$

1.2 时频峰值滤波噪声消除技术

时频峰值滤波技术所处理的一类实际含噪信号 $s(t)$ 可以建模为

$$s(t) = x(t) + n(t) \quad (5)$$

式中, $x(t)$ 是有效信号, 它可能是由许多带限的、

非平稳的、确定性分量组成的, 即 $x(t) = \sum_{k=1}^p x_k(t)$,

$n(t)$ 表示加性白高斯噪声, 它可能与有效信号具有重叠的频谱。主要需要解决的问题是要在通过含噪信号 $s(t)$ 所含信息恢复出原始信号 $x(t)$ 。但是, 由于噪声与信号的频谱重叠, 很难在频域将有效信号干净地恢复出来。时频峰值滤波方法可以在不需要假设条件的情况下干净地恢复出有效信号。时频峰值滤波具体步骤如下:

1) 对含噪信号进行编码, 使其成为瞬时频率。

将含噪信号 $s(t)$ 进行频率调制, 得到单位幅度的解析信号 $z(t)$ 为

$$z(t) = e^{j2\pi\mu \int_{-\infty}^t s(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

式中, μ 是频率调制指数。根据瞬时频率的定义, 含噪信号 $s(t)$ 是解析信号 $z(t)$ 的瞬时频率。

2) 取解析信号的 $z(t)$ 的伪 Wigner-Ville(PWVD)

分布的峰值, 即对解析信号做瞬时频率估计, 作为有效信号 $x(t)$ 的估计值。

$$\hat{x}(t) = \hat{f}(t) = \frac{\arg \max(W_z(t, f))}{\mu} \quad (7)$$

式中, $W_z(t, f)$ 是解析信号 $z(t)$ 的 PWVD。

对于高噪声情况, 可以采用迭代 TFPF 算法, 即重复步骤(1)、(2), 直到符合系统要求。

2 基于时频峰值滤波信号增强技术的电力线通信系统

在电力线通信系统中, 很多学者研究了何种调制技术更适用于电力线通信系统, 但是, 并没有一个统一的标准。由于单载波系统结构简单, 成本低, 在电力线通信系统中, 非常适合低速率传输的情况。传统的频移键控(FSK)及相移键控(PSK)被研究应用于电力线通信系统^[12-13]。另一方面, 因为多载波系统能够有效地降低多径干扰, 减轻窄带干扰和冲击噪声的影响, 所以对于高速电力线通信系统, 多载波技术诸如多载波码分多址(MC-CDMA)、正交频分复用(OFDM)和离散多音(DMT)技术被广泛应用于电力线通信系统^[14-16]。因此, 对于电力线通信系统, 在不同的应用环境应该采取不同的调制技术。本文为了简便起见, 采用单载波QPSK载波系统, 可以有效地验证信号增强技术的作用。根据文献[17]给出的电力线通信系统, 本文采用如图1所示的电力线通信系统。

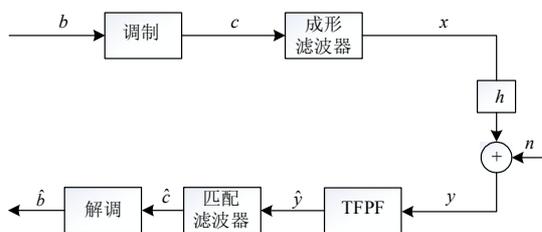


图 1 仿真实用电力线通信系统

Fig. 1 System model used in our simulation

在电力线通信系统中, 电力线通信信道的影响可以通过均衡算法进行均衡。另一方面, 另一个影响通信系统质量的是冲击噪声, 但是, 目前, 对于冲击噪声的消除技术, 越来越受到人们的重视, 早期消除冲击噪声的影响主要是参数方法, 比如预滤波技术, 迭代解码器等^[17-18]。目前, 更多的研究集中在非参数的噪声消除技术, 并产生了基于压缩感知和贝叶斯学习算法的噪声消除技术^[7]。但是, 在电力线通信系统中, 由于发射器的发射功率低的特征, 即使对于冲击噪声消除的情况, 依然可能造成

信噪比过低, 而无法保证可靠通信的情况。因此, 本文针对低信噪比情况, 只考虑在背景噪声的情况下, 对电力线通信信号的增强技术。

如图 1, 因为没有考虑冲击噪声, 电力线通信系统可以表示成式(8)。

$$y = x * h + n \quad (8)$$

式中: x 是通过成形滤波器的预发送的信号; y 为通过电力线通信信道和噪声影响的接收信号; n 为电力线信道背景噪声。对于接收到的信号 y , 应用时频峰值滤波算法对原信号进行恢复, 从而得到原有信号, 达到消除噪声、增强信号的目的。

3 实验仿真

为了更好地说明算法的有效性, 本文首先验证 TFPF 在信号噪声消除方面的有效性, 然后再验证 TFPF 在电力线通信系统的表现。在验证 TFPF 在电力系统的表现中, 为了能够说明 TFPF 算法的有效性, 本文利用 Matlab 仿真单载波 PSK 电力线通信系统。正如上文所说, 考虑到现有的冲击噪声消除技术, 仿真只考虑背景噪声。另一方面, 考虑某些电力线通信系统低发送功率特征, 考虑信噪比范围为 $-10 \sim 0$ dB 的误码率(BER)比较。调制为 QPSK, 成形滤波器的滚降系数为 0.5。

3.1 时频峰值滤波算法的有效性

为了简便起见, 本文通过以下方法验证时频峰值滤波算法的有效性。利用式(9)产生信号波形, 然后加入噪声, 最后通过 TFPF 算法去噪, 来验证算法的有效性。为了陈述方便, 式(9)产生的信号为线性调频信号, 记为 $x(t)$, 加入噪声后的信号记为 $y(t)$, 经过 TFPF 一次去噪后的信号为 $\hat{y}(t)$ 。

$$x(t) = \cos(0.005m + 7.5 \times 10^{-7} m^2) \quad (9)$$

为了说明算法的有效性, 首先比较 $x(t)$, $y(t)$ 和 $\hat{y}(t)$ 的信号波形, 波形比较如图 2。图 2 绘制在 SNR 为 -4 dB 的情况。从上至下, 依次为 $x(t)$, $y(t)$ 和 $\hat{y}(t)$ 的波形。从 $x(t)$ 和 $y(t)$ 波形比较可以看出, 信号在 SNR 为 -4 dB 情况下, 原波形被噪声严重影响, 已经失去了原有波形形状。因此, 同理可以想到, 作为典型噪声信道的电力线信道, 低信噪比情况存在于电力线通信系统, 通信质量会因为噪声的影响大大降低。但是, 对比 $x(t)$ 和 $\hat{y}(t)$ 的波形可以看出, 波形非常相似。这是由于 TFPF 算法使得噪声被消除, 信号被一定程度地恢复。

虽然噪声被去除, 信号被一定程度的恢复, 但是, 从图中可以看出, 信号并没有恢复到理想情况。波形中仍然含有大量的噪声, 为了进一步去除噪声,

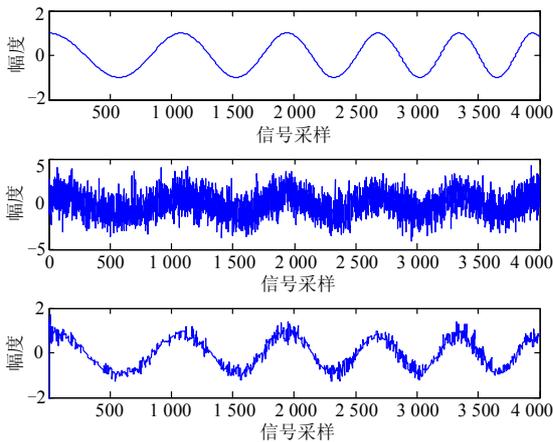


图 2 $x(t)$ 、 $y(t)$ 和 $\hat{y}(t)$ 的波形比较

Fig. 2 Waveform comparison of $x(t)$, $y(t)$ and $\hat{y}(t)$

达到提高通信质量的目的，可以对信号 $\hat{y}(t)$ 再进行一次 TFPF，得到的结果记为 $\hat{y}_1(t)$ 。 $\hat{y}(t)$ 和 $\hat{y}_1(t)$ 的波形比较如图 3。从图 3 中可以看出，信号通过 2 次滤波后，噪声明显减少，且波形明显趋于原有信号波形。因此，对于高噪声环境下，当一次滤波可能无法得到满意结果，并不能将信噪比提高至满意水平的时候，可以对其进行多次迭代 TFPF，进一步降低噪声，提高信号能量，达到系统满意结果。

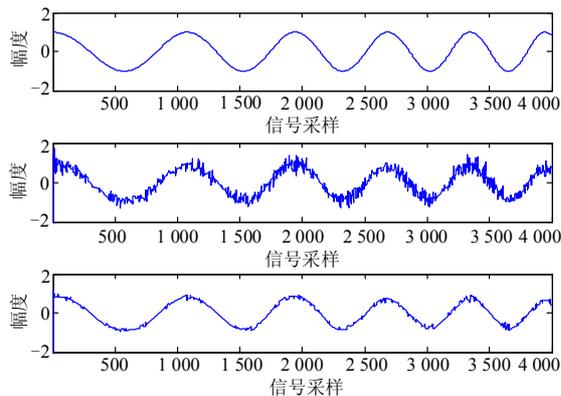


图 3 $x(t)$ 、 $\hat{y}(t)$ 和 $\hat{y}_1(t)$ 的波形比较

Fig. 3 Waveform comparison of $x(t)$, $\hat{y}(t)$ and $\hat{y}_1(t)$

另一方面，为了说明 TFPF 算法的精度，我们比较了信号的绝对误差，并绘制于图 4。从上至下，依次为 $x(t)$ 和 $y(t)$ 波形的绝对误差， $x(t)$ 和 $\hat{y}(t)$ 波形的绝对误差， $x(t)$ 和 $\hat{y}_1(t)$ 波形的绝对误差。从图 4 的上部分图可以看出，由于噪声的影响，波形之间的绝对误差很大，这也间接说明信号受到了噪声严重干扰。但是，从图 4 第二张图可以看出，因为 TFPF 算法的引入，绝对误差降低了很多，间接说明通过了 TFPF 信号增强技术的信号波形更接近于原始信号波形。这也从另一个方面说明了 TFPF 信

号增强技术的有效性。而从最下面一张图可以看到，经过二次滤波，绝对误差进一步降低，可以得知，经过多次滤波后，信号更能趋近于原信号，对低信噪比、高噪声环境下的信号恢复有非常重要的指导意义。换句话说，在高噪声环境下，通信系统可以通过引入迭代 TFPF，多次滤波降低噪声影响，使得通信质量大大提高。

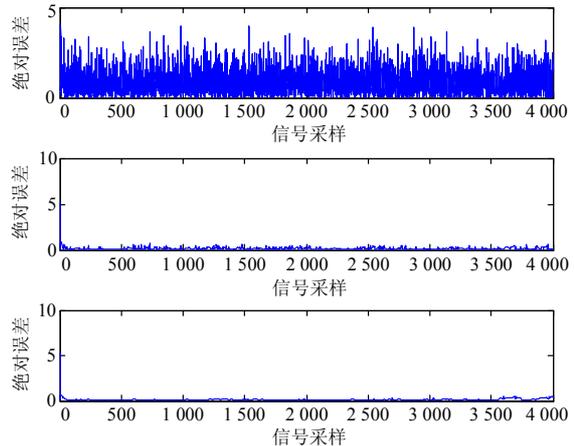


图 4 绝对误差比较

Fig. 4 Absolute error comparison

3.2 电力线通信系统中时频峰值滤波算法有效性验证

从上面的讨论可以知道，TFPF 能够有效地在低信噪比情况下，进行噪声消除。巧合的是，由于电力线通信信道中大量噪声的存在，商用电力线通信系统中低发射功率特征，使得即使在冲击噪声消除的情况下，电力线通信系统仍存在低信噪比情况。表明了 TFPF 算法将适用于电力线通信系统，对于高噪声情况，可以像上文所说的采用多次滤波，迭代 TFPF 算法。

为了说明 TFPF 在系统中的表现，我们仿真了 QPSK、PSK 和 FSK 通信系统，并比较在 SNR 为 $-10\sim 0$ dB 的 BER 表现。图 5 为 QPSK 系统的 BER 比较图，图 6 为 PSK 系统的 BER 比较图，图 7 为 FSK 系统的 BER 比较图。图中，没有利用 TFPF 增强的 BER 被标记为“*No mitigation*”，通过 TFPF 噪声消除后的 BER 标记为“*TFPF*”。

从图 5~图 7 中可以看出，在没有信号增强技术的情况下，有用信号被淹没在噪声之中，导致非常高的误码率，严重影响通信系统质量。这会导致电力线通信系统不安全和不可靠。因此，为了改善电力线通信系统质量，本文用 TFPF 信号增强算法来消除噪声对信号的影响。由图可以看到，在利用了 TFPF 算法后，系统 BER 大大降低，系统可靠性得到极大的提升。说明 TFPF 算法应用在电力线通信系统的有效性。

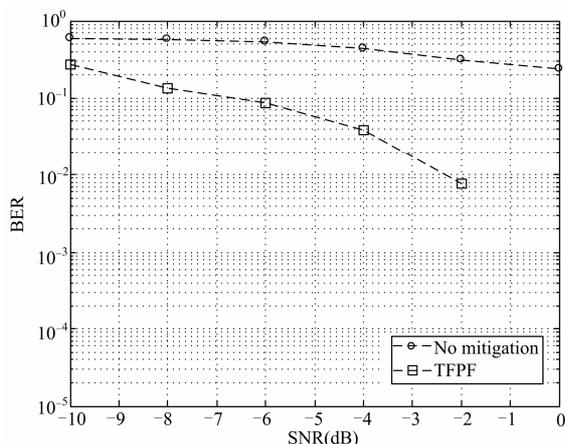


图 5 QPSK 系统的 BER 比较图

Fig. 5 BER performance of the proposed algorithm in PLC QPSK communication system

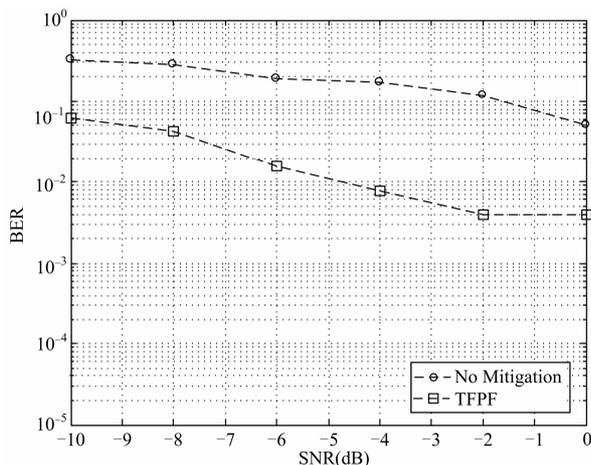


图 6 PSK 系统的 BER 比较图

Fig. 6 BER performance of the proposed algorithm in PLC PSK communication system

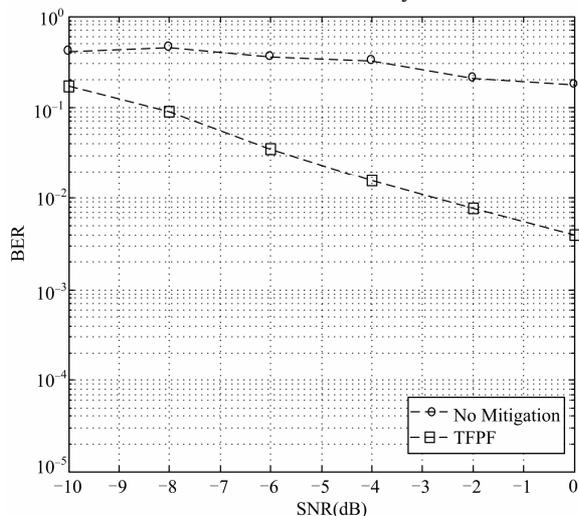


图 7 FSK 系统的 BER 比较图

Fig. 7 BER performance of the proposed algorithm in PLC FSK communication system

4 结论

本文首次将时频峰值滤波算法引入到电力线通信系统中。利用 TFPF 噪声消除, 能够很好地满足电力线通信系统低信噪比的特殊情况。实验结果表明, TFPF 可以有效地消除噪声, 对原始信号进行增强, 并在低信噪比情况良好工作, 为保证电力线通信系统在高噪声情况下安全可靠工作提供了一种新方法。

参考文献

- [1] 何中一, 邢岩, 祁彪杰, 等. 电压基准预同步的逆变器并联运行控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 115-121. HE Zhongyi, XING Yan, QI Biaojie, et al. Control for inverters in parallel operation with pre-synchronized voltage references[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 115-121.
- [2] 刘晓胜, 张良, 周岩, 等. 低压电力线载波通信新型组网模型性能分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 271-277. LIU Xiaosheng, ZHANG Liang, ZHOU Yan, et al. Performance analysis of novel low voltage power line communication model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 271-277.
- [3] 张良, 刘晓胜, 戚佳金, 等. 一种低压电力线通信改进分级蚁群路由算法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 318-324. ZHANG Liang, LIU Xiaosheng, QI Jiabin, et al. Study of improved hierarchical ant colony routing algorithm for low-voltage power line communication[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 318-324.
- [4] 郭昊坤, 吴军基, 衡思坤, 等. 低压电力线通信信道噪声建模及仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 61-66. GUO Haokun, WU Junji, HENG Sikun, et al. Modeling and simulation of the noise in low voltage power line communication channel[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 61-66.
- [5] 吴军基, 郭昊坤, 孟绍良, 等. 电力线通信信道背景噪声建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 6-10. WU Junji, GUO Haokun, MENG Shaoliang, et al. Modeling of background noise in power line communication channel[J]. Power System Protection and Control, 2012, 39(23): 6-10.
- [6] 郭昊坤, 吴军基, 应展烽, 等. 一种改进的马尔科夫链及其在电力线通信信道脉冲噪声建模中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 129-132. GUO Haokun, WU Junji, YING Zhanfeng, et al. Application of improved Markov chain in impulse noise modeling of power line communication channel[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 129-132.

- [7] LIN J, NASSAR M, EVANS B L. Impulsive noise mitigation in powerline communications using sparse bayesian learning[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(7): 1172-1183.
- [8] GUZEL T, USTUNEL E, CELEBI H, et al. Noise modeling and OFDM receiver design in power-line communication[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2735-2742.
- [9] BOASHASH B, MESBAH M. Signal enhancement by time-frequency peak filtering[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(4): 929-937.
- [10] LIN H, LI Y, YANG B, et al. Seismic random noise elimination by adaptive time-frequency peak filtering[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(1): 337-341.
- [11] TIAN Y, LI Y. Parabolic-trace time-frequency peak filtering for seismic random noise attenuation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(1): 158-162.
- [12] KARL M, DOSTERT K. Selection of an optimal modulation scheme for digital communications over low voltage power lines[C] // IEEE 4th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications Proceedings, 1996, 3: 1087-1091.
- [13] CAVDAR I. Performance analysis of fsk power line communications systems over the time-varying channels: measurements and modeling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 111-117.
- [14] HOQUE K, DEBIASI L, DE NATALE F. Performance analysis of MC-CDMA power line communication system[C] // IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, 2007: 1-5.
- [15] ZHANG J, MENG J. Noise resistant OFDM for power-line communication systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 693-701.
- [16] LIU Jianming, ZHAO Bingzhen, GENG Liang, et al. Communication performance of broadband PLC technologies for smart grid[C] // IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2011: 491-496.
- [17] NASSAR M, GULATI K, SUJEETH A, et al. Mitigating near-field interference in laptop embedded wireless transceivers[C] // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing ICASSP, 2008: 1405-1408.
- [18] HARING J, VINCK A J H. Iterative decoding of codes over complex numbers for impulsive noise channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(5): 1251-1260.

收稿日期：2014-04-14； 修回日期：2014-06-03

作者简介：

苏岭东(1985-), 男, 博士研究生, 从事电力线噪声技术研究; E-mail: adong5432@126.com

翟明岳(1970-), 男, 通信作者, 教授, 从事电力线通信关键技术研究; E-mail: mingyue.zhai@gmail.com

何欣(1995-), 男, 从事信号处理研究。