

基于 EMD-TFPF 算法的电力线通信噪声消除技术研究

翟明岳, 苏岭东

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 针对电力线通信系统中, 发射端与接收端之间存在大量噪声严重影响通信质量的情况, 引用时频峰值滤波算法(Time-Frequency Peak Filtering, TFPF)作为噪声消除技术。考虑时频峰值滤波算法中窗长选择的严格限制, 引用经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)方法对TFPF进行改进。将信号分解为不同模态, 在不同模态采用不同窗长进行TFPF滤波, 以在信号保真和噪声压制方面得到更好的权衡。实验证明, 相对原始TFPF, 该方法具有更好的信号保真和噪声压制作用, 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; 经验模态分解; 时频峰值滤波

A noise mitigation method based on EMD-TFPF in powerline communication system

ZHAI Mingyue, SU Lingdong

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Beijing 102206, China)

Abstract: In the power line communication system (PLC), large amount of noise exist between transmitter and receiver which seriously affects the reliability of the signal transmission. This paper presents a noise mitigation method based on time-frequency peak filtering (TFPF). However, there is a large restriction to TFPF by the selection of window length. In order to obtain the good trade-off between noise suppression and amplitude preservation, this paper adopts EMD method to assist TFPF. It utilizes the decomposition characteristic of EMD which can decompose a signal to a series of intrinsic mode functions (IMFs) from high frequency to low frequency and select different window length for these modes. Numerical experiments show that the EMD-TFPF method can effectively eliminate the power line communication system noise, reduce the Bit Error Rate (BER) and improve the quality of communication system. Moreover, it can make a better tradeoff between noise suppression and amplitude preservation.

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

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

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)07-0051-06

0 引言

电力通信网是保证电力系统安全稳定运行的重要基础设施, 随着我国智能电网建设的大力推进, 各电力公司纷纷将电力通信网的建设工作作为智能电网建设的一个重要环节。虽然微波、光纤等通信技术已经应用于电力通信系统中, 但是利用现有电力线进行通信的技术, 因其不需重新铺设线路, 经济成本低一直受到人们的重视^[1-2]。

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^[3-4]。信号传输过程中的多径效应和频率选择性衰落, 非线性和非平稳性特征, 都严重阻碍着电力线通信系统的应用。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。这些噪声严重影响系统的可靠性, 导致系统通信质量降低。因此噪声成为了阻碍电力线通信系统应用的一大难题。

为了提高电力线通信质量, 大量国内外学者对电力线信道噪声及噪声消除技术进行了研究。文献

[5-7]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的影响。文献[8-9]基于电力线噪声模型,研究电力线通信信号噪声消除方法。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,有必要研究在低噪声情况下的噪声消除技术。

近年来,时频峰值滤波算法(TFTP)广泛应用于地震探测、信号处理等领域^[10-11],即使在信噪比为-9 dB 情况下也可以有效实现噪声消除^[12]。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的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。但是在 TFPF 算法中,窗长的选择会带来信号保真和噪声压制两方面的矛盾:长窗长能够很好地压制随机噪声,但是有效信号的幅值衰减很大;短窗长能够很好地保护有效信号的幅值,但是在噪声压制方面的力度不够。而信号波形幅度的保真和噪声的压制直接影响到电力线通信系统的通信质量。因此,针对 TFPF 这种情况,我们采用一种权衡方案,在信号处理之前先对信号采用 EMD 分解,得到一系列的 IMF 分量,根据噪声主导模态(高频)和信号主导模态(低频),采用不同的窗长进行处理,从而达到信号幅度和噪声压制双方面的均衡。

仿真实验证明,相对传统的 TFPF 算法,EMD-TFPF 在信号幅度和噪声压制方面能够更好的平衡,提高估计精度,提升通信系统通信质量。

1 时频峰值滤波算法(TFPF)

1.1 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

$$s(t) = x(t) + n(t) \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 是有效信号; $n(t)$ 表示加性白高斯噪声。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 $z(t)$:

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

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。

$$\hat{x}(t) = \hat{f}(t) = \frac{\arg \max(W_z(t, f))}{\mu} \quad (3)$$

式中, $W_z(t, f)$ 是解析信号 $z(t)$ 的 PWVD。

1.2 时频峰值滤波算法中窗长对信号幅度和噪声压制的影响

为了说明传统的 TFPF 算法, 窗长的选择在信号的幅度和噪声压制方面存在矛盾。简便起见, 本文通过以下方法验证。利用式(4)产生信号波形, 然后加入噪声, 最后通过传统的 TFPF 算法去噪, 来说明窗长选择对于信号幅度和噪声压制方面存在一定的矛盾性。选择仿真信号为线性调频信号。

$$x(t) = \cos(0.005m + 7.5 \times 10^{-7} m^2) \quad (4)$$

对线性调频信号加入-4 dB 的噪声, 然后对比在不同窗长下, TFPF 滤波后的信号波形。图 1 中给出的是信号 $x(t)$ 的波形和加噪后的信号 $y(t)$ 的对比, 可以看出, 在噪声的影响下, 信号已经受到严重的污染, 从而需要噪声消除技术尽可能地恢复原始信号。

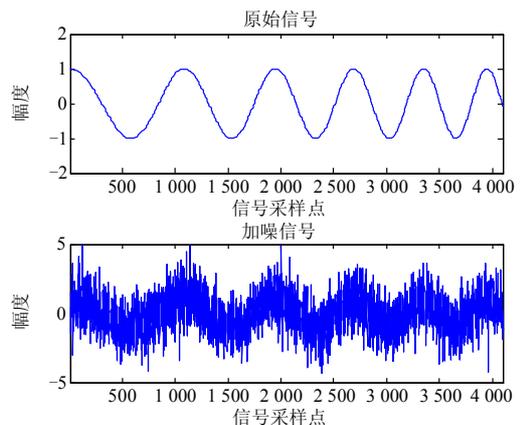


图 1 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的波形比较

Fig. 1 Waveform comparison of $x(t)$ and $y(t)$

在图 2 中, 我们选用不同窗长的 TFPF 算法, 对含噪信号 $y(t)$ 进行处理, 并与原始信号进行对比。从上至下, 分别是原始信号 $x(t)$, 较长窗长的 TFPF 处理结果, 较短窗长的 TFPF 处理结果。

从图 2 中可以看出, 在经过 TFPF 处理后, 噪声都有所减小, 证明了 TFPF 算法在噪声压制方面

的有效性。但是从不同窗长的波形比较可以看出, 在较长窗长的情况下, 噪声压制的更好, 信号被恢复的更好。但是较长的窗长却使得信号在幅度方面损失更大, 尤其是在波峰与波谷的位置, 因为在窗长内信号被视为线性的, 所以在波峰波谷位置, 对于信号的估计是有偏估计, 导致精度下降, 信号损失。

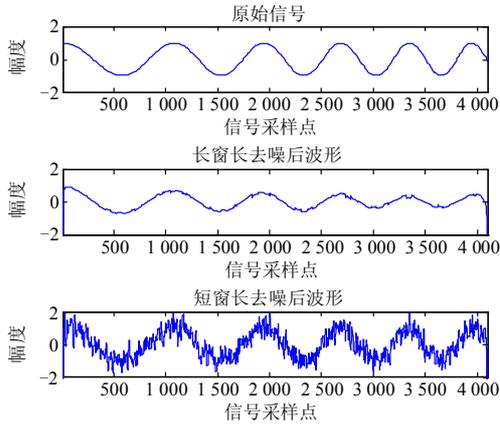


图 2 不同窗长下滤波结果比较

Fig. 2 Waveform comparison in different length of windows

观察较小窗长的滤波结果, 可以看到, 在较小窗长情况下, 信号的波形和幅度损失较小, 在窗长范围内更接近于线性, 也更符合 TFPF 无偏估计的条件, 但是在噪声压制方面却不能够令人满意。可以在滤波后波形中看出, 滤波后波形依然残留较严重的噪声干扰。依然影响着系统的整体性能。

因此, 可以得出这样的结论, 窗长的长短直接影响到信号保幅和噪声压制的效果。长窗长得到更好的噪声压制效果, 但是却可能破坏原始信号的波形。短窗长会更好的保存信号波形, 但是却不能更好的压制噪声。而信号波形的保真和噪声的压制又直接影响到通信系统的质量, 因此, 需要进行一种更好的平衡方案。

虽然对于窗长的选择有一些经验公式, 但是对于一段通信信号选用统一的窗长, 依然不是最优的处理方法。

2 基于经验模态分解的 TFPF 算法

本文针对 TFPF 窗长选择方面的问题, 在进行 TFPF 之前, 对信号进行经验模态分解, 将信号分解成不同的模态, 对不同的模态选择不同的窗长进行处理。从而达到更好的噪声压制和信号保真的平衡。

EMD 分解首先将信号分解为一系列的本征模

态, 最先分解出来的是高频分量, 一般是噪声主导的模态。接着依次是频率越来越低的模态, 逐渐出现信号主导的模态分量, 最后分解出来的是所得的残量。

EMD 实际是 HHT 的一部分, 将信号分解为频率由高至低的本征模态(IMF), 分解出来的各 IMF 分量包含了原信号的不同时间尺度的局部特征信号。该方法根据信号本身的时间尺度特征来进行信号分解, 不需要预先设定任何基函数。因此, EMD 从理论上来说, 可以适用于任何类型的信号分解。因而在处理非平稳及非线性数据上, 具有明显的优势, 适合于分析非平稳、非线性信号。

对于信号 $x(t)$, 找出其所有的极大值和极小值, 并用 3 次样条曲线分别拟合 $x(t)$ 的上、下包络线, 记拟合好的上下包络线的均值为 $m_{1,i}(t)$ 。将原始数据 $x(t)$ 减去 $m_{1,i}(t)$, 得到一个去掉低频的新数据 $h_{1,i}(t)$ 。

$$h_{1,i}(t) = x(t) - m_{1,i}(t) \quad (5)$$

式中, i 为拟合次数。将 $h_{1,i}(t)$ 视为新的 $x(t)$, 重复上面步骤, 直到满足下列条件:

- 1) 在整个信号长度上, 极值点和过零点的数目必须相等或者至多只相差一个;
- 2) 在任意时刻, 由极大值点定义的上包络和由极小值点定义的下包络的平均值为零, 即信号的上下包络关于时间轴对称。

当然, 也可以由相邻两次结果的标准方差值作为分解结束的条件。对于 $k-1$ 次后的结果 $h_{1,k-1}(t)$, k 次后的结果 $h_{1,k}(t)$, 则

$$S_d = \sum_{t=0}^T \frac{|h_{1,k-1}(t) - h_{1,k}(t)|^2}{h_{1,k}^2(t)} \quad (6)$$

若 S_d 在 0.2~0.3 范围内, 则第一阶段的分解结束, 对应的第一个 IMF 分量就是 $h_{1,k}(t)$ 。

将第一个 IMF 分量从 $x(t)$ 去除, 剩余量为 $r_1(t)$, 重复上述分解过程, 得到多个 IMF 分量 $c_i(t)$, 最后得到一个代表信号平均趋势的残量 $r_n(t)$, 当 $r_n(t)$ 足够小或者为单调函数, 分解结束。而 $x(t)$ 则可以表示为 IMF 分量和残量 $r_n(t)$ 之和。

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (7)$$

虽然 EMD 可以将噪声主导的模态和信号主导的模态分离。但是 EMD 存在一个固有的缺点, 就是模态混叠效应, 即噪声主导的模态并不完全是噪声, 还包含着有用信号; 信号主导的模态混杂着噪

声,也并不全是信号。因此,对于 EMD 分解出来的一系列信号,并不能简单的予以抛弃和保留,而是应该分别处理。

因此,考虑到 EMD 自身的缺陷和 TFPF 算法中窗长选择的矛盾,将两者结合的 EMD-TFPF 算法更适合于通信系统噪声消除。基于 EMD-TFPF 的通信信号去噪算法的步骤总结如下:

1) 对通信信号进行 EMD 分解,分解出噪声主导的高频分量和信号主导的低频分量;

2) 根据分量的不同,选用不同窗长的 TFPF 对 IMF 分量进行处理,窗长的选取原则为:

因为噪声主导的高频分量中,主要成分为噪声,因此选用长窗长对高频 IMF 进行噪声压制;而信号主导的低频分量因为噪声含量少,信号成分多,因此选取短窗长,主要是保持信号成分,去除少量的噪声分量。

3) 对处理过的 IMF 进行相加,并加上残量,最终得到处理后的通信信号。

3 实验仿真

目前,在电力线通信系统中,已经研究了将多种调制技术应用于电力线通信系统中,但是,并没有一个统一的标准。一方面,由于单载波系统结构简单、成本低,非常适合低速率传输的情况。因此,传统的频移键控(FSK)及相移键控(PSK)已经被研究应用于电力线通信系统^[13-14]。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)、正交频复用(OFDM)和离散多音(DMT)技术被广泛应用于电力线通信系统^[15-17]。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。

为了说明本算法的有效性,简便起见,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-10~0 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。图 3 为本文使用的电力线通信系统仿真图。

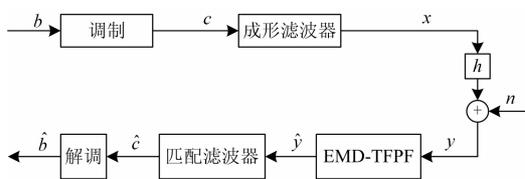


图 3 仿真所用电力线通信系统

Fig. 3 PLC system model used in our simulation

如图 3,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。

图 4 中给出了在-4 dB 情况下,信号 x 和加噪信号 y 的部分波形比较,可以看出,信号被噪声严重污染,无法达到安全可靠通信的要求。

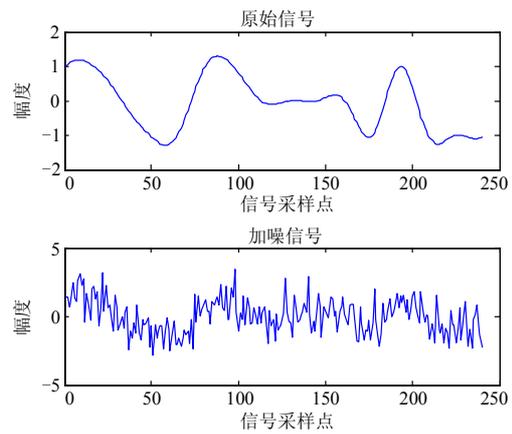


图 4 仿真所用电力线通信系统

Fig. 4 PLS system model used in our simulation

对于加噪信号 y , 我们利用本文的 EMD-TFPF 处理,首先对信号进行 EMD 分解,分解结果如图 5 所示。

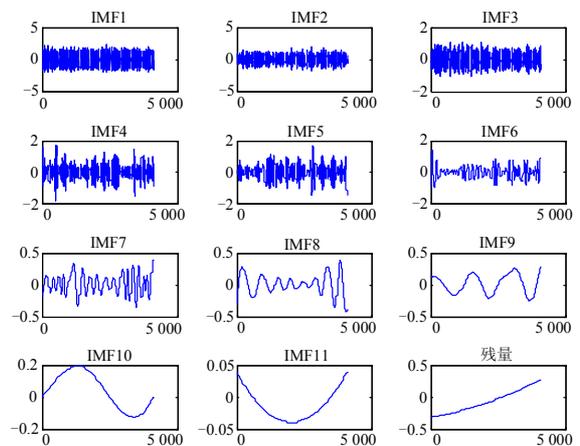


图 5 仿真所用电力线通信系统

Fig. 5 PLC system model used in our simulation

图 5 中横坐标为采样点数,纵坐标为幅度。从图 5 中可以看出,经过 EMD 分解过后,信号被分解为一系列的模态分量,而且频率由高到低。可以

看出, 高频分量为噪声主导的模式分量, 而低频分量则代表着信号主导的模式分量。对于噪声主导的模式分量, 因噪声占大部分, 因此采用长窗长进行处理。而对于信号主导的 IMF, 则采用短窗长处理。

为了说明 EMD-TFPF 算法的优越性, 我们将原始信号、单一窗长 TFPF 处理过的信号和 EMD-TFPF 处理过后的信号的部分波形对比于图 6 进行说明, 波形比较仿真于 -4 dB 下。

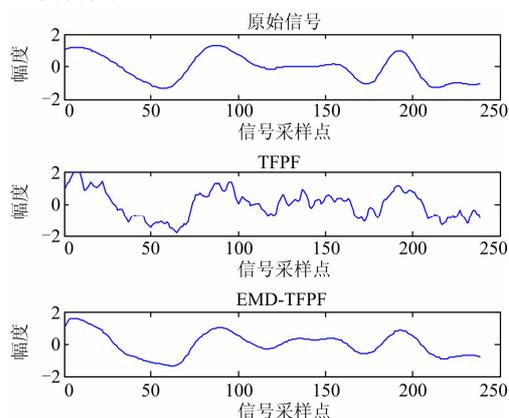


图 6 仿真所用电力线通信系统

Fig. 6 System model used in our simulation

可以看出, 经过 EMD-TFPF 处理过后的波形更接近与原始信号的波形。而且, 因为传统的 TFPF 选用的是统一的窗长, 所以在某些波峰波谷因为窗长内非线性的问题, 会导致估计偏差, 出现波动。因此, 可以说明, 对于本文利用的 EMD-TFPF 算法相对于原始 TFPF 更具有优越性, 能够更好地提高电力线通信系统的可靠性和通信质量。

为了说明 EMD-TFPF 在系统中的表现, 我们仿真了 QPSK 通信系统, 并比较在 SNR 为 -10~0 dB 的 BER 表现。图 7 为 BER 比较图。图 7 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”, 通过 EMD-TFPF 噪声消除后的 BER 记为 “EMD-TFPF”。

从图 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 和 EMD-TFPF 信号增强算法来消除噪声对信号影响。图 7 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 算法在电力线通信系统的有效性。由于 EMD-TFPF 在信号波形和噪声上的综合权衡, 使得系统的误码率得到进一步的降

低, 进一步的提高了系统的可靠性。

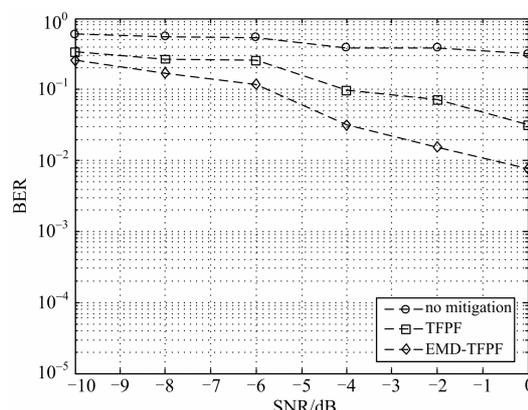


图 7 系统的 BER 比较图

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

4 结论

本文针对传统 TFPF 的窗长选择在信号幅度和噪声压制上的矛盾性, 采用 EMD 分解来改进 TFPF 算法。实验结果表明, EMD-TFPF 不仅可以有效地消除噪声, 对原始信号进行增强, 在低信噪比情况下良好工作, 并且相对原始 TFPF 算法, 可以进一步提高系统的可靠性, 保证系统安全可靠通信, 提高信噪比。

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] 梁明, 吴志勇, 王博, 等. 基于 BPL 的工业监控系统级芯片 MCBPL1500A 的研制[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(7): 68-72. LIANG Ming, WU Zhiyong, WANG Bo, et al. Development of chipset MCBPL1500A for industrial monitoring and control based on BPL[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(7): 68-72.
- [3] 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.
- [4] 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 Jiajin, et al. Study of improving hierarchical ant colony routing algorithm for low-voltage power line communication[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 318-324.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [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] BOASHASH B, MESBAH M. Signal enhancement by time-frequency peak filtering[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52 (4): 929-937.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] ZHANG J, MENG J. Noise resistant ofdm for power-line communication systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 693-701.
- [17] 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.

收稿日期: 2014-12-03; 修回日期: 2015-03-05

作者简介:

翟明岳(1970-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为电力线通信关键技术研究。E-mail: mingyue.zhai@gmail.com

苏岭东(1985-), 男, 博士生, 主要研究方向为电力线通信信道噪声消除技术研究;

(编辑 魏小丽)