

DOI: 10.7667/PSPC160282

小波基在低压电力线信道有色背景噪声建模中的应用研究

索超男, 张慧, 赵雄文

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 小波马尔科夫链法可用于低压电力线信道中有色背景噪声的建模, 但小波基函数的不同会对噪声的建模精度产生较大影响。基于常用的几种小波基函数对同一组有色背景噪声分别开展小波马尔科夫链仿真建模, 并计算了建模前后的功率谱密度及其均方根误差。研究结果表明, Daubechies、Biorthogonal 和 Haar 小波基函数中 Daubechies 小波基函数的建模精度较高, Haar 小波基次之, Biorthogonal 小波的建模效果较差。在这 3 种小波基函数中, Daubechies 小波可选为有色背景噪声进行小波马尔科夫链建模的最佳小波基函数。

关键词: 小波马尔科夫链; 有色背景噪声; 小波基函数; Biorthogonal 小波; Daubechies 小波; Haar 小波

Research on the application of wavelet basis functions in modeling of colored background noise for low-voltage power line channels

SUO Chaonan, ZHANG Hui, ZHAO Xiongwen

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

Abstract: The wavelet packet transform and peak typed Markov chain can be used to model the colored background noise for low-voltage power line channels. Different wavelet basis functions have a major impact on the accuracy of noise modeling. Under different wavelet basis functions, the simulated colored background noise is modeled by wavelet packet transform and peak typed Markov chain respectively, and their power spectrum densities before and after modeling are calculated as well as their corresponding root-mean-square errors (RMSE). In the aspect of modeling accuracy, it can be found that the Daubechies wavelet is the best and the Haar wavelet followed. Therefore, the Daubechies wavelet is the best wavelet basis function of the wavelet packet transform and peak typed Markov chain, which can be used to model the colored background noise in low-voltage power line channels.

Key words: wavelet packet transform and peak typed Markov chain; colored background noise; wavelet basis functions; Biorthogonal wavelet; Daubechies wavelet; Haar wavelet

0 引言

电力线通信(Power Line Communication, PLC)是一种以电力线为传输媒介进行信息互换的通信方式, 是多年来人们一直关注的研究领域^[1]。噪声干扰是影响 PLC 可靠性的主要因素之一, 它会使用信号误码率增加, 降低通信质量, 严重时会导致通信中断。因此, 为提高电力线通信系统的抗干扰能力, 有必要对低压电力线中噪声干扰进行精确的建模研究。

低压电力线信道中存在着五类噪声^[2-3], 即: 有色背景噪声、窄带噪声、同步工频的周期脉冲噪声、异步工频的周期脉冲噪声和随机脉冲噪声。有色背景噪声可被视为一个平稳随机过程, 建模手段较为

成熟^[4]。由于脉冲噪声的幅值、脉宽、间隔以及符号变化之间的统计特性的时变性, 不可将其视为平稳随机过程, 因此其建模研究相对较少。有学者提出一种名为峰式马尔科夫链的脉冲噪声建模方法, 在此基础上, 人们将小波包变换与峰式马尔科夫链结合起来为背景噪声建模, 即小波峰式马尔科夫链法。小波变换有多种特性各异的小波基函数, 在为噪声建模时采用的小波基函数不同也会对建模效果产生较大影响。有文献仅采用一种小波基函数为背景噪声建模, 不同小波基函数对建模效果的影响以及具有最佳建模效果的小波基函数还有待研究。

本文研究了在为仿真得到的低压电力线中的有色背景噪声进行小波马尔科夫链建模时, 不同小波基函数对建模精度的影响, 并通过对比各个小波基

下建模前后功率谱密度的均方根误差确定了具有最佳建模效果的小波基函数。首先利用自回归模型在 Matlab 平台上仿真得到有色背景噪声, 其后将 Daubechies 小波、Biorthogonal 小波和 Haar 小波分别作为小波包变换的基函数为有色背景噪声进行小波马尔科夫链建模, 并计算出建模前后的功率谱密度 (Power Spectrum Density, PSD) 及其均方根误差。仿真结果表明, Daubechies 小波、Biorthogonal 小波和 Haar 小波基函数在电力线有色背景噪声建模中, Daubechies 小波基函数的建模精度较高, Haar 小波基次之, Biorthogonal 小波的建模效果较差。在电力线有色背景噪声建模常用的 3 种小波基函数中, Daubechies 小波基函数性能最佳。

1 有色背景噪声仿真

有色背景噪声主要由普通家用电器, 如电脑、电冰箱等产生, 它可以在频率高达 30 MHz 的范围内引起干扰^[5-6], 其功率谱密度随频率的增加而减小。这种噪声在时域上是一个变化缓慢的随机过程, 一般通过自回归模型对其进行建模。文献[6]中利用固纬(GW)的 GSP-810 频谱分析仪开展对实验室有色背景噪声的测试, 得出其频谱在[-85, -65] dB 缓慢变化。基于文献[6], 本文在该频谱范围内随机产生 10 000 个数据作为有色背景噪声的频谱, 并根据这些数据利用 Matlab 的内置函数 aryule 得到 AR 噪声滤波器的系数, 进而确定其冲激响应 $h(n)$ 。然后利用 wgn 函数产生长度为 10 000 的均值为 0、方差为 1 的白噪声序列, 并将其作为 AR 噪声整形滤波器的输入, 则输出的便是有色背景噪声。仿真出的有色背景噪声的幅度变化缓慢, 是一平稳随机过程, 其功率谱密度随着频率的升高而呈下降趋势。可将其作为本文中建模的噪声源。

2 小波峰式马尔科夫链

2.1 小波基函数

若 $\psi(t) \in L^2(R)$, 其傅立叶变换 $\psi(w)$ 满足式(1)。

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} |w|^{-1} |\psi(w)|^2 dw < \infty \quad (1)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$$

则称 ψ 为一个基小波, 将基小波进行平移伸缩之后, 会生成一个函数族 $\psi_{a,b}(t)$, 被称为连续小波函数。

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

式中: a 为伸缩因子; b 为平移因子。 $a, b \in L^2(R)$ 且

$a \neq 0$ 。若将 a, b 离散化, 通常取

$$\begin{cases} a = a_0^m \\ b = nb_0 a_0^m \end{cases} \quad (3)$$

式中, $m, n \in Z$, 将式(3)代入式(2)中, 得到的函数族称为离散小波序列, 如式(4)所示。

$$\psi_{m,n}(t) = |a_0|^{-m/2} \psi(a_0^{-m}t - nb_0) \quad (4)$$

实际应用中通常取 $a_0 = 2, b_0 = 1$ 。

小波基函数用于信号的小波变换中。支撑长度是选择小波基的一个重要标准, 它指的是当时间或频率趋于无穷大时, 小波函数从一有限值收敛到零的长度。支撑长度越长, 耗费的计算时间越长, 也会产生更多高幅值的小波系数。“紧支撑”概念指的是: 对于一个函数 $f(x)$, 若自变量 x 在 0 附近的取值范围内, 函数能取到值, 在其他范围内取值为 0, 则该函数称为紧支撑函数。具有紧支撑特性的小波基函数中, 常用的有以下 3 种^[7]。

1) Haar 小波。它是小波分析理论中最早用到的一个具有紧支撑正交性的小波函数, 也是最简单的小波函数。其定义为

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq 0.5 \\ -1 & 0.5 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (5)$$

2) Daubechies 小波。该小波函数简记为 dbN 函数, 其中 N 代表序列长度, N 取 2, 3, ..., 10。它是紧支撑标准正交小波, 没有明确的表达式, 常用于离散小波分析。

3) Biorthogonal(biorNr.Nd)小波。该小波具有线性相位, 主要用于信号和图像的重构。它采用一个函数对信号进行分解, 另一个函数对信号进行重构, 有效兼顾了信号的准确性和对称性。

2.2 小波包变换

小波包变换是一种精确的信号分析方法, 在时频域都可以表征信号的局部特征, 可以用来检测信号的瞬间变化。且其具有很强的自适应时频信号处理要求的能力, 很适合用来分析时变性极强的噪声信号。它同时对信号的高、低频部分进行多层分解, 提高了信号的时频分辨率^[8-10]。它由小波分解滤波器 H, G 和小波重构滤波器 h, g 对信号进行分解和重构。其分解算法如下:

$$\begin{cases} A_0[f(t)] = f(t) \\ A_j[f(t)] = \sum_k H(2t-k)A_{j-1}[f(t)] \\ D_j[f(t)] = \sum_k G(2t-k)A_{j-1}[f(t)] \end{cases} \quad (6)$$

式中: $f(t)$ 为原始信号; H, G 为小波分解滤波器;

t 为离散时间序列号, $t=1,2,\dots,N$, N 为原始信号长度; j 为分解层数, $j=1,2,\dots,J$, $J=\log_2 N$; A_j 、 D_j 分别为信号 $f(t)$ 在第 j 层的低频部分和高频部分的小波系数。从式(6)中可得, A_j 由第 $j-1$ 层的低频部分小波系数 A_{j-1} 与分解滤波器 H 卷积, 然后对卷积结果进行隔点采样得到; D_j 由第 $j-1$ 层的低频部分的小波系数 A_{j-1} 与分解滤波器 G 卷积, 然后对卷积结果进行隔点采样得到。

将信号重构为原来的一维信号称为小波包逆变换, 其重构算法为

$$A_j[f(t)] = 2 \left\{ \sum_k h(t-2k)A_{j+1}[f(t)] + \sum_k g(t-2k)D_{j+1}[f(t)] \right\} \quad (7)$$

式中, j 表示分解层数, 若分解的最高层为 J , 则 $j=J-1, J-2, \dots, 1, 0$, $J=\log_2 N$; h 、 g 为小波重构滤波器。从式(7)可以看出, A_j 是由第 $j+1$ 层低、高频部分的小波系数先进行隔点插零再分别与重构滤波器 h 、 g 卷积最后相加得到的。直到得到 A_0 , 即原始信号 $f(t)$ 为止, 完成重构过程。

2.3 峰式马尔科夫链

对于马尔科夫链 $x(n)$ 来说, 若 $k+1$ 时刻的状态 $x(k+1)$ 不仅与 $x(k)$ 有关, 还与 $x(k)$ 和 $x(k-1)$ 之间的相互关系有关, 即当 $x(k) > x(k-1)$ 时, $x(k+1) > x(k)$ 的概率大于 $x(k+1) < x(k)$ 的概率; 当 $x(k) < x(k-1)$ 时, $x(k+1) < x(k)$ 的概率大于 $x(k+1) > x(k)$ 的概率, 此类特殊的马尔科夫链序称为峰式马尔科夫链(Peak-type Markov Chain)^[11]。其可用来处理随机信号。

2.4 小波峰式马尔科夫链

小波峰式马尔科夫链是一种把小波包变换与峰式马尔科夫链相结合的电力线信道背景噪声建模方法^[12]。其具体建模方法为: 先采用小波包变换对仿真到的噪声信号进行 n 层小波包分解, 即将原始噪声信号划分为 2^n 个频段, 每个频段内的噪声数据组合称为一个小波包系数; 分别对这 2^n 个小波包系数进行峰式马尔科夫链建模, 得到新的小波包系数, 最后将各组小波包系数逐层重构, 得到建模后的噪声序列。

3 不同小波基对建模效果的影响

均方根误差(Root-mean-square error, RMSE)指的是观测值与建模值偏差的平方和与观测次数的比值的均方根^[13]。它对一组测量中的特大或特小误差反应非常敏感, 所以, 能够很好地评价数据的变化

程度。其具体的计算公式如式(8)所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (8)$$

式中: n 为观测次数; $X_{obs,i}$ 、 $X_{model,i}$ 分别为第 i 次的观测值和建模值。可用均方根误差来定量描述不同小波基对建模精度的影响。

为了研究常用的不同小波基函数对信号建模效果的影响以确定具有最佳建模效果的小波基函数, 本节将Harr小波基、Biorthogonal小波基和Daubechies小波基分别作为对仿真的同一组有色背景噪声进行小波马尔科夫链建模时的小波基, 并计算出了各个小波基下建模前后的功率谱密度及其均方根误差。各个小波基函数下建模前后功率谱密度的对比图分别如图1、图2、图3所示。

从图1、图2、图3可以看出, 3个小波基建模后的PSD与原始噪声的PSD之间均具有不错的拟合效果, 都可以用作有色背景噪声小波马尔科夫链建模的小波基函数。

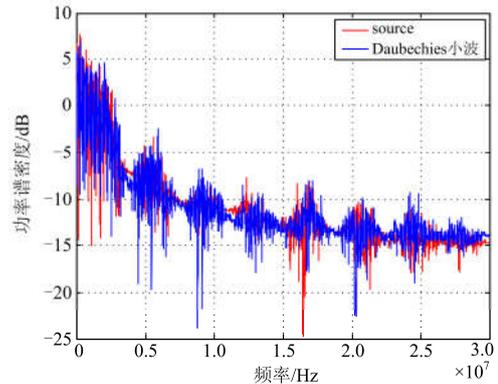


图1 Daubechies小波基建模前后PSD对比

Fig. 1 Comparison of the PSDs for the Daubechies wavelet

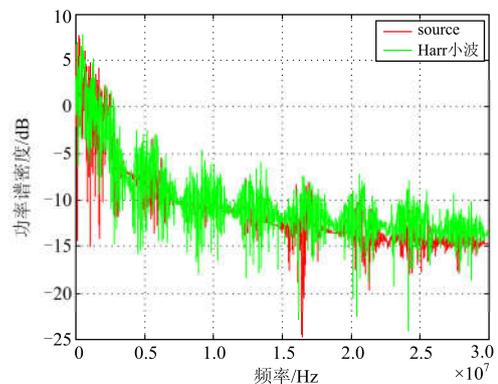


图2 Haar小波基建模前后PSD对比

Fig. 2 Comparison of the PSDs for the Haar wavelet

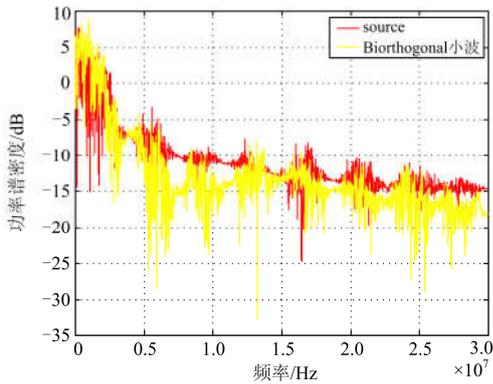


图3 Biorthogonal小波建模前后PSD对比

Fig. 3 Comparison of the PSDs for the Biorthogonal wavelet

为了定量分析不同小波基函数的建模精度，计算了建模前后PSD的均方根误差，如式(9)。

$$\begin{cases} Rmse_{db} = 1.29 \\ Rmse_{haar} = 1.53 \\ Rmse_{bior} = 2.36 \end{cases} \quad (9)$$

式中， $Rmse_{db}$ 、 $Rmse_{haar}$ 、 $Rmse_{bior}$ 分别表示小波基为Daubechies小波、Haar小波、Biorthogonal小波时建模前后噪声功率谱密度的均方根误差，单位为dB，均方根误差越小，建模精度越高。由式(9)可以看出，Daubechies小波基函数的建模精度较高，Haar小波基次之，Biorthogonal小波的建模效果较差。虽然Daubechies小波和Haar小波之间的建模精度差别仅为零点几分贝，但由于Haar小波在时域上是不连续的，所以将其作为基本小波性能不是特别好。综上所述，在电力线有色背景噪声建模常用的3种小波基函数中，Daubechies小波基函数性能最佳。

4 总结

噪声干扰是影响电力线通信可靠性的主要因素之一。低压电力线中噪声干扰的高精度建模研究对提高电力线通信质量意义重大。小波马尔科夫链可用于低压电力线信道有色背景噪声的建模。小波基函数的不同会对噪声的建模精度产生重要影响。本文在不同的小波基函数条件下，分别对仿真得到的有色背景噪声进行小波马尔科夫链建模并计算了建模前后的功率谱密度及其均方根误差，通过定量对比确定了具有最佳建模效果的小波基函数。仿真结果表明，Daubechies小波、Biorthogonal小波和Haar小波均可用作有色背景噪声小波马尔科夫链建模的小波基函数；Daubechies小波基函数的建模精度较高，Haar小波基次之，Biorthogonal小波的建模效果较差；在电力线背景噪声建模中常用的3种小波

基函数中，Daubechies小波基函数建模的效果最佳，建议在低压电力线信道有色背景噪声的建模中推广应用。

参考文献

- [1] 伍韵文, 郭劲松, 吴海东, 等. 宽带电力线载波MIMO系统干扰消除预编码方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 123-126.
WU Yunwen, GUO Jinsong, WU Haidong, et al. Precoding method for eliminating interference of broadband PLC MIMO system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 123-126.
- [2] 苏岭东, 翟明岳, 何欣. 基于时频峰值滤波的电力线通信噪声消除方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 15-20.
SU Lingdong, ZHAI Mingyue, HE Xin. A new noise mitigation method based on time frequency peak filtering in powerline communication system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 15-20.
- [3] 翟明岳, 曾庆安. 低压电力线通信信道的马尔柯夫特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 116-121.
ZHAI Mingyue, ZENG Qingan. Markov characteristics of low voltage power line communication channel research[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 116-121.
- [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, 2011, 39(23): 6-10.
- [6] 吴旭. 低压电力线载波通信噪声环境的仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2007.
WU Xu. Simulation and research low voltage power line carrier communication noise environment[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2007.
- [7] 刘晓明, 赵洋, 曹云东, 等. 基于小波变换的交流系统串联电弧故障诊断[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 10-17.

- LIU Xiaoming, ZHAO Yang, CAO Yundong, et al. Series arc fault diagnosis based on wavelet transform in AC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 10-17.
- [8] 张淑清, 马跃, 李盼, 等. 基于改进的广义谐波小波包分解和混沌振子的小电流接地系统故障选线[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 13-20.
- ZHANG Shuqing, MA Yue, LI Pan, et al. Application of improved generalized harmonic wavelet packet decomposition and chaos oscillator to fault line detection in small current grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 13-20.
- [9] 刘珑, 李胜, 王轶卿. 基于小波包变换的脑电波信号降噪及特征提取[J]. 计算机工程与科学, 2015, 37(4): 790-795.
- LIU Long, LI Sheng, WANG Yiqing. EEG signal de-noising based on wavelet packet transform and feature extraction[J]. Engineering and Computer Science, 2015, 37(4): 790-795.
- [10] 田中大, 李树江, 王艳红, 等. 基于小波变换的风电场短期风速组合预测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 112-120.
- TIAN Zhongda, LI Shujiang, WANG Yanhong, et al. Short-term wind speed combined prediction for wind farms based on wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 112-120.
- [11] 郭昊坤. 低压电力线通信信道噪声建模研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- GUO Haokun. Low voltage power line communication channel noise modeling research[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [12] 李陈灵. 基于小波马尔科夫链的电力线噪声建模研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- LI Chenling. Modeling research of noise in power line based on Markov chain[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [13] 姚海燕, 张静, 刘毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 115-123.
- YAO Haiyan, ZHANG Jing, LIU Yi, et al. Method of cable incipient faults detection and identification based on multi-scale wavelet criterions and time-frequency feature association[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 115-123.

收稿日期: 2016-03-07; 修回日期: 2016-05-14

作者简介:

索超男(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力线通信; E-mail: 563533518@qq.com

张慧(1989-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电力线通信; E-mail: 545446472@qq.com

赵雄文(1964-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为无线和电力线通信。E-mail: zhaowx@ncepu.edu.cn

(编辑 魏小丽)