

# 双密度双树小波变换的闪电信号去噪研究

火元莲<sup>1,2</sup>, 张广庶<sup>1</sup>, 吕世华<sup>1</sup>, 王彦辉<sup>1</sup>, 李亚珺<sup>1</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**为了克服噪声对闪电信号数据处理的影响,提出了一种基于双密度双树小波变换的闪电信号去噪方法。采用该方法分别对标准闪电波和实测的闪电信号进行了去噪研究,实验结果表明双密度双树小波变换能够有效滤除闪电信号中的噪声,效果优于传统的小波阈值法,而且比硬件去噪更加经济、方便和实用,值得进一步的推广和应用。

**关键词:**双密度双树小波;小波阈值法;闪电信号;去噪

**中图分类号:**TP391.41 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.09.26

## Lightning signals denoising with double density dual tree wavelet transform

HUO Yuan-lian<sup>1,2</sup>, ZHANG Guang-shu<sup>1</sup>, LÜ Shi-Hua<sup>1</sup>, WANG Yan-hui<sup>1</sup>, LI Ya-jun<sup>1</sup>

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000; 2. Physics and Electronic Engineering College of Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:**To alleviate the effect of noise on lightning signal data processing, a denoising method based on Double Density Dual Tree wavelet is proposed. General lightning signal and real lightning signal are denoised with this method respectively. Experiment results show the proposed method can effectively alleviate noise of lightning signal and it is superior to the traditional wavelet threshold. Compared with denoising method based on hardware, the proposed method is more economical, convenient and practical.

**Key words:**double density dual tree wavelet transform; wavelet thresholding; lightning signal; denoising

### 1 引言

在闪电信号采集、处理和传输的过程中,不可避免地要受到各种外界干扰,即所谓的闪电噪声信号。噪声的存在,会使所采集的信号发生一定程度的畸变,甚至使有用的信号完全淹没在噪声中,这给后期的数据处理和分析带来很多不便,甚至可能会影响到分析的结果,造成重大的误差,因此在资料使用中如何进行降噪处理已成为急需解决的问题。通过有效地去除闪电信号中的噪声,提高闪电信号的可靠性,可以更好地了解闪电的发生发展过程,理解闪电现象的物理机制<sup>[1-3]</sup>。目前,闪电信号的去噪主要依赖于硬件滤波电路,但这种技术对硬件电路要求较高,而且不容易调整,采集到的信号还是混有各种噪声。

研究者将小波阈值法应用于闪电瞬态电场信号的去噪<sup>[4]</sup>,并和信号去噪常用的传统滤波方法作了比较,取得了较好的效果。但实际由于小波变换<sup>[5-6]</sup>的二抽取使得非线性小波阈值在降噪过程中引起了较大混叠,带来畸变,严重影响了小波系数表征原信号特征的能力。其缺陷主要表现在两个方面<sup>[7-10]</sup>:①平移敏感性。平移敏感性是指输入信号一个很小的平移会使小波系数产生非常明显的变

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 41075002, 40775004);国家自然科学基金重点项目(No. 41030960);公益性行业科研专项基金(No. GYHY201006005-03)资助。

**作者简介:**火元莲(1973-),女,博士生,主要研究方向为大气电学与信号处理。E-mail:huoyuanlian@163.com

**收稿日期:**2013-01-23; **修订日期:**2013-02-29

化。虽然小波滤波器组能够保证信号完美重构,或者说低通和高通分量的总能量对于信号平移能够保持不变,但是低通和高通分量却不能单独保持平移不变。这一缺陷可能使小波变换在提取信号特征时,丢失一些重要信息,产生错误的结果。②缺乏方向选择性。二抽取过程突出了某些方向的信息,弱化了其它方向的信息,也不利于提取完整的信号信息。由美国学者 Selesnick 于 2004 年提出<sup>[11]</sup>的双密度双树小波变换与传统的小波变换相比较,双密度双树小波变换同时具有双密度小波变换和双树小波变换的优点,即平移不变性、有限的冗余性、良好的方向性等,在信号处理中有着潜在的应用价值。最近,有研究者将双密度双树小波变换应用于二维图像信号的去噪<sup>[12-14]</sup>、融合<sup>[15]</sup>等领域,并取得了很好的效果。本文首次尝试性的将双密度双树小波变换应用于一维的闪电信号去噪中,并和小波阈值法去噪进行了比较,仿真结果表明该方法较小波阈值法更适用于闪电瞬态电场信号的去噪。双密度双树小波变换在有效去除闪电信号中噪声的同时,很好的保持了原始闪电信号的基本变化,而且比硬件去噪更加经济、方便和实用,值得进一步的推广和应用。

### 2 双密度双树小波变换

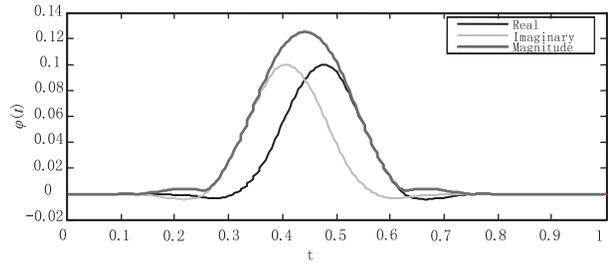
双密度双树小波变换采用两个尺度函数 $\varphi_h(t)$ 、 $\varphi_g(t)$ 和四个不同的小波函数 $\psi_{h,i}(t)$ 、 $\psi_{g,i}(t)$ ( $i=1,2$ ),如图(1)所示,其中的两个小波函数彼此之间偏移半个单位,即:

$$\psi_{h,1}(t) \approx \psi_{h,2}(t-0.5); \psi_{g,1}(t) \approx \psi_{g,2}(t-0.5) \quad (1)$$

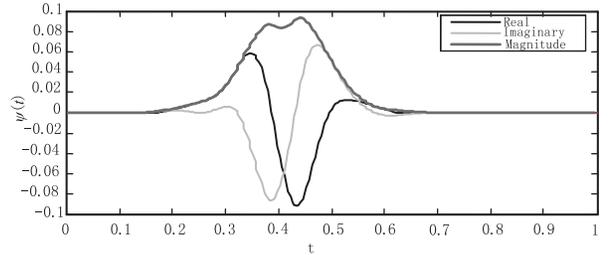
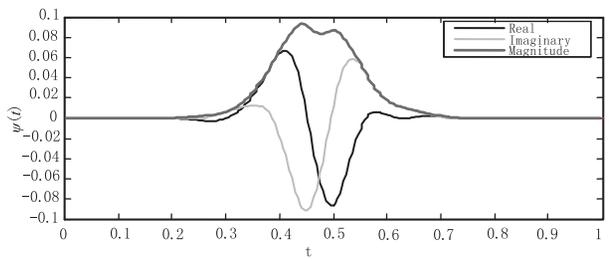
其余的两个小波函数构成近似的希尔伯特变换对,即:

$$\psi_{g,1}(t) \approx H\{\psi_{h,1}(t)\}; \psi_{g,2}(t) \approx H\{\psi_{h,2}(t)\} \quad (2)$$

双密度双树小波变换采用了平行的两组 6 个希尔伯特滤波器 $h_i(t), g_i(t)$ ( $i=0,1,2$ ),如图(2)所示。其中 $h_0(t), g_0(t)$ 为低通滤波器, $h_1(t), g_1(t)$ 为一阶高通滤波器, $h_2(t), g_2(t)$ 为二阶高通滤波器,在变换过程中两组滤波器同时作用在输入数据上采用过采样迭代滤波来实现,每层变换仅对低频部分进行进一步分解,并通过将两棵树的系数进行组合,用上部树 A 的叠加滤波器组表示复数小波变换的实部;下部树 B 的叠加滤波器组表示复数小波变换的虚部,即形成双密度双树小波变换。与传统的小波变换相比较,双密度双树小波变换可降低时移敏感性,具有良好的方向性等优势。



(a) 双密度双树小波变换的尺度函数



(b) 双密度双树小波变换的小波函数

图 1 双密度双树小波变换的小波函数

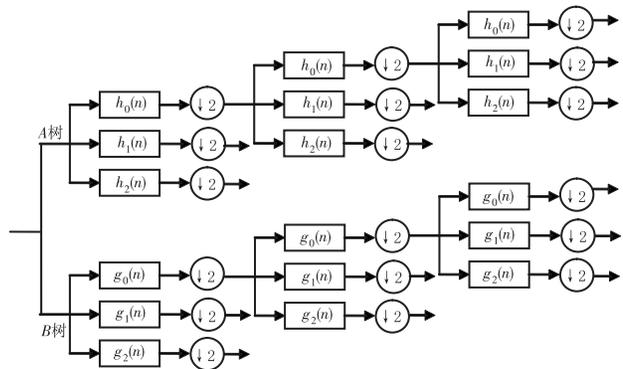


图 2 双密度双树小波变换的滤波器组

### 3 双密度双树小波变换对标准闪电波形的去噪分析

标准闪电波可归结为双指数衰减型脉冲波形,既脉冲波形随时间近似指数规律上升至峰值,然后又近似指数规律下降。根据该理论,标准闪电波的时域波形可采用 Bruce-Golde<sup>[16]</sup>方程来模拟:

$$E(t) = E_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (3)$$

式中, $E_0$ 为脉冲波形的幅值系数; $\alpha$ 为波前衰减系数; $\beta$ 为波尾衰减系数。本文在仿真过程中取 $E_0 = 30 \text{ V/m}$ , $\alpha = 1.0 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ , $\beta = 1.5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ ,采样频率 $f_s = 60 \text{ MHz}$ 。在脉冲上叠加一个信噪比(SNR)为 30 dB 的高斯白噪声信号,分别利用小波

阈值法和双密度双树小波变换法对含噪信号进行消噪处理。小波函数取 db5 小波,分解层数定为 6。仿真结果如图(3)所示,其中图(3(a))为仿真的原始信号;图(3(b))为叠加了信噪比为 30dB 的高斯白噪声的染噪信号;图(3(c)~(d))为分别采用双密度双树小波变换和小波阈值法滤除噪声后的结果。

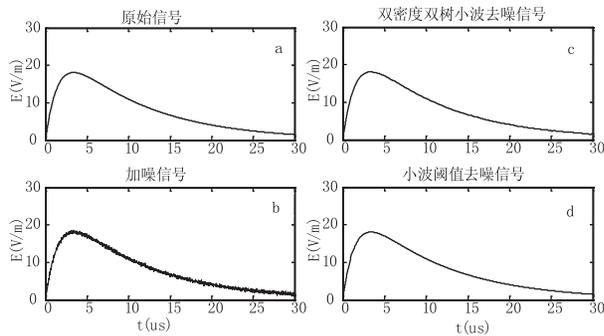


图 3 标准闪电波形去噪的仿真结果

为比较两种方法的去噪效果,同时计算了信噪比(SNR)和均方误差(MSE),这两个参数都可用于分析原始信号和去噪信号的相似性,即度量去噪效果。信噪比越大,均方误差越小,说明去噪效果越好。仿真结果如表(1)所示,结果表明双密度双树小波去噪优于小波阈值去噪。

表 1 两种方法的滤波结果比较

方法	信噪比(SNR)	均方误差(MSE)
双密度双树小波法	28.0870	0.0445
小波阈值法	27.7738	0.0490

#### 4 双密度双树小波变换对自然闪电信号的去噪分析

本文分析的资料是 2009 年 6~8 月期间在青海大通地区进行的多站雷电多参量自然闪电观测实验记录,测站海拔高度为 2534m,属雷电多发区。每个测站安装有用于闪电辐射脉冲三维定位的闪电 VHF 辐射源到达时间差(TOA)定位系统和 GPS 同步的高精度时钟( $\pm 25$  ns),另外还有用于闪电快电场变化测量的宽带电场变化探测仪(带宽 100Hz~10MHz,时间常数 100us)、快电场变化探测仪(带宽 100Hz~5MHz,时间常数 1ms)、慢电场测量仪(带宽 10Hz~2MHz,时间常数 6s)以及大气平均电场仪( $\pm 50$  kV/m),这些仪器获得模拟信号通过数字化 A/D 板卡转换后送入 PC 微机记录。中心站另安装有闪电 VHF 窄带干涉仪系统等。7 个测站用无线宽带接入系统连接组成测量网络,数据采集可由中心站控制或自动运行。本文利用快电场变化测量仪

记录的资料,分别用双密度双树小波变换和小波阈值法对地闪和云闪个例信号进行了去噪处理,这里规定电场正向变化,对应云中的负电荷被中和,反之亦然。

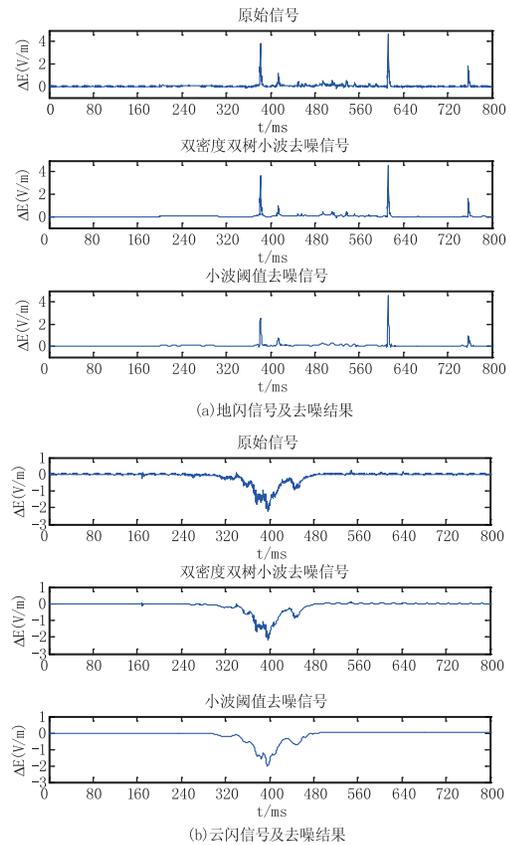


图 4 实测快电场信号的去噪结果

实验结果表明小波阈值去噪的效果比双密度双树小波去噪效果要平滑,但实际由于闪电的发生具有随机、短时、突变等特点,是一种典型的非平稳信号,其中包含了许多尖峰或突变部分。小波阈值法在去噪的同时也平滑了原始信号中的个别突变部分,致使去噪信号与原始信号相差较大,丢失了一些重要的细节特性;而双密度双树小波分析在有效去除噪声的同时很好的保持了原始信号的细节变化和基本特性,提高了闪电信号的可靠性,便于进一步的分析 and 处理。

#### 5 结论

本文将近年来在信号处理中有着潜在应用价值的双密度双树小波变换应用于闪电信号的噪声去除中,由于结合了双密度小波和双树小波的优势,使得该方法在一定程度上优于小波变换,仿真结果表明该方法能够有效去除闪电信号中的噪声,而且比硬件去噪更加经济、方便和实用,值得进一步的推广和应用。

感谢 2009 ~ 2011 年青海大通雷电观测实验的全体人员的支持,感谢青海省气象局人影办以及大通县人影办在野外实验中给予的支持。

### 参考文献:

- [1] Wang Yanhui, Zhang Guangshu, Zhang Tong, et al. Analyses on regular pulses burst in electromagnetism radiation of lightning [J]. Plateau Meteorology, 2009, 5 (10): 1018 - 1024. (in Chinese)  
王彦辉, 张广庶, 张彤, 等. 闪电电磁辐射中的爆发式窄脉冲序列分析[J]. 高原气象, 2009, 5(10): 1018 - 1024.
- [2] Lan Yu, Zhang Yijun, Li Weitao, et al. The lightning radiation field spectra of cloud-to-ground, intra-cloud flashes and narrow bipolar events in the intervals of 0.1 to 40 MHz [J]. Plateau Meteorology, 2009, 5 (10): 1025 - 1033. (in Chinese)  
蓝渝, 张义军, 吕伟涛, 等. 0.1 ~ 40 MHz 地闪、云闪及 NBE 事件的辐射场频谱特征分析[J]. 高原气象, 2009, 5(10): 1025 - 1033.
- [3] Cao Dongjie, Tian Liyan, Xiao Jin, et al. A fast recording, display and waveform analysis system on multi parameter of lightning flash [J]. Plateau Meteorology, 2011, 2 (4): 518 - 524. (in Chinese)  
曹冬杰, 田立言, 肖瑾, 等. 闪电多参量高速大容量实时数据采集、显示和分析系统[J]. 高原气象, 2011, 2 (4): 518 - 524.
- [4] Li Peng, Zheng Yi, Zhang Yijun. Denoising methods of lightning transient electrical signals [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19 (12): 2055 - 2059. (in Chinese)  
李鹏, 郑毅, 张义军. 闪电瞬态电场信号波形去噪方法[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(12): 2055 - 2059.
- [5] Feisi Science and Technology Research Center. Wavelet analysis and MATLAB R2007 Application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)  
飞思科技产品研发中心编著. 小波分析理论与 MATLAB7.0 实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [6] Li Yingchun, Sun Jiping, Fu Xingjian. Infrared image denoising based on wavelet transform [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(10): 988 - 991. (in Chinese)  
李迎春, 孙继平, 付兴建. 基于小波变换的红外图像去噪[J]. 激光与红外, 2006, 36(10): 988 - 991.
- [7] Kingsbury N G. Image processing with complex wavelets [J]. Phil. Trans. Roy. Soc., 1999, 357(9): 2543 - 2560.
- [8] Li Mingxi, Mao Hanping, Zhang Yancheng. Study of the actual image denoising method based on lift-wavelet analysis and median filter technology [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(10): 1109 - 1111. (in Chinese)  
李明喜, 毛罕平, 张艳诚. 基于提升小波变换和中值滤波的图像去噪方法研究 [J]. 激光与红外, 2007, 37 (10): 1109 - 1111.
- [9] Zhou Yunchuan, He Yongqiang, Li Jitian. Infrared image enhancement method based on wavelet transformation and grayscale morphology [J]. Laser & Infrared, 2011, 41 (6): 683 - 686. (in Chinese)  
周云川, 何永强, 李计添. 基于小波和灰度形态学的红外图像增强方法 [J]. 激光与红外, 2011, 41(6): 683 - 686.
- [10] Selesnick I W, Baraniuk R G, Kingsbury N G. The dual-tree complex wavelet transform [J]. IEEE Signal Processing magazine (S1053 - 5888), 2005, 22(6): 123 - 151.
- [11] Selesnick I W. The double density dual tree [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(5): 1304 - 1314.
- [12] Li Peng, Yu Gang, Ji Xiaoyan, et al. Denoising of ultrasonic image via double density dual tree wavelet combined with bivariate shrinkage with local variance estimation [J]. Journal of System Simulation, 2007, 24(12): 5797 - 5801. (in Chinese)  
李鹏, 喻罡, 冀晓燕, 等. 基于双密度双树小波变换的超声图像降噪 [J]. 系统仿真学报, 2007, 24(12): 5797 - 5801.
- [13] Yao Bin, Zheng H anyuan, Zhang Heng, et al. Image Denoising via double density dual tree wavelet transform [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2010, 28(2): 261 - 264. (in Chinese)  
姚斌, 郑汉垣, 张衡, 等. 基于双密度双树小波变换的图像去噪 [J]. 石河子大学学报 (自然科学版), 2010, 28(2): 261 - 264.
- [14] Guo Wei, Zhang Ping, Chen Xi, et al. Research on synthetic aperture radar image denoising with double density dual tree complex wavelet transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 1747 - 2752. (in Chinese)  
郭巍, 张平, 陈曦, 等. 基于双密度双树复数小波变换的合成孔径雷达图像降噪研究 [J]. 电子学报, 2009, 37(12): 1747 - 2752.
- [15] Yue Jin, Yang Ruliang, Huan Ruohong. Research on image fusion with double density dual-tree complex wavelet transform [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(1): 129 - 133. (in Chinese)  
岳晋, 杨汝良, 宦若虹. 基于双密度双树复数小波变换的图像融合研究 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(1): 129 - 133.
- [16] C F Wagner, G D McCann. Induced voltages on transmission lines [J]. Trans. Amer. Inst. Elec. Engrs., 1942, 61: 916 - 930.