

文章编号: 2096-1618(2016)02-0175-05

大气电场仪资料的小波去噪研究

余蓉^{1,2}, 杜牧云¹, 杜九三³

(1. 中国气象局武汉暴雨研究所暴雨监测预警湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 湖北省防雷中心, 湖北 武汉 430074; 3. 宜昌市气象局, 湖北 宜昌 443000)

摘要:大气电场仪作为目前唯一针对云内电荷量进行不间断监测的系统,在雷电的监测和预警方面发挥着重要作用。以双指数衰减脉冲信号上叠加高斯白噪声来仿真大气电场信号,并计算去噪前后仿真信号与实测大气电场信号的均方误差,对比分析不同小波函数、阈值分析方法和小波分解层数的去噪效果。由分析结果可以发现,选用 db5 或 sym5 小波,并结合 rigsure 阈值分析法的去噪效果较好,并且可自适应确定最优小波分解层数。

关键词:数据处理;大气电场仪;小波去噪;仿真信号;分解层数

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

0 引言

雷电作为联合国国际十年委员会公布的最严重的10种自然灾害之一^[1],受到社会的广泛关注,而雷电活动的预报预警一直是科学研究的重点和难点。大气电场强度作为大气电学的一个基本参数,在晴天电学、雷暴电学及闪电的研究中具有重要意义,在雷暴和闪电监测中具有重要作用^[2-3]。大气电场仪是利用导体在电场中产生感应电荷的原理测量大气电场及其变化的设备。雷电活动往往引起大气电场的显著变化^[4-5],当云中发生电荷分离时,地面电场将发生相应的变化,其强度与云中电荷的积累量和分布有关,因此通过测量地面大气电场的变化,可以反演出高空云层电场的变化,对发生雷击的危险性做出一定的预报。大气电场仪能够全天候24小时监测大气电场的变化,从而能完整记录雷暴从发生发展到衰弱消亡的整个过程,因此其在雷电监测预警方面具有不可比拟的作用。但是在大气电场仪的实际工作中,周边环境中的任何电荷变化都会对大气电场信号产生相应的影响,其实测信号不仅包含需要的雷电信号,也掺杂了一些非雷电信号,即噪声信号,因此,滤除噪声信号就成为对大气电场资料进行统计分析 with 特征提取前的首要任务。

近年来,小波理论得到迅速的发展,而且由于其具备良好的时频特性,因而在信号分析和图像处理等方面得到非常广泛的应用。在信号去噪领域中,小波理论也同样受到许多学者重视,应用小波进行去噪并获

得非常好的效果^[6-8]。相较于传统的数字滤波器,小波去噪方法更具灵活性,不仅能获得较高的信噪比,还能保持良好的分辨率^[9]。目前,利用小波分析方法进行大气电场信号去噪的研究相对较少,李振亚等^[7]探索了小波分析在雷击大气电场波形去噪分析中的应用,取得一定的研究成果。在其基础上引入更多的小波函数进行对比分析,并实现最优小波分解层数的自适应确定。

1 小波去噪原理

1.1 小波分析

小波分析方法是一种窗口大小(即窗口面积)固定但其形状可变,且时间窗和频率窗可变的时频局部化分析方法。因此,小波变换具有对信号的自适应性。小波分析优于傅里叶变换的根本原因就在于对时域和频域同时具有良好的局部化特性。

设 $\Psi(t) \in L^2(R)$ ($L^2(R)$ 表示平方可积的实数空间,即能量有限的函数空间),并且满足^[10]

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

则称 $\Psi(t)$ 为一个基本小波或者母小波函数,将 $\Psi(t)$ 经过伸缩和平移,可得到一个小波序列,即:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

其中, a 为伸缩因子, b 为平移因子,且 $a, b \in R, a \neq 0$ 。可见,小波分析就是傅里叶分析思想方法的拓展。

1.2 小波分解与重构

当信号和噪声相互混叠时,其各自的小波系数幅

收稿日期: 2016-03-02

基金项目: 湖北省雷电灾害防御科研专项资助项目 (FL-Z-201401); 湖北省防雷中心自立资助项目 (FL-N-2013013)

度和分布不相同,其中,信号对应的小波系数包含了信号的重要信息,其幅值较大,但数目较少;而噪声对应的小波系数则是一致分布的,幅值较小,但个数较多。因此,通过对小波系数进行合适的阈值处理便能实现信号去噪。

如图1所示,小波去噪过程包含3个基本步骤,首先,根据选好的小波函数及分解层数对信号 S 进行小波分解,其中,噪声信号通常分布在高频小波系数(CD)里;然后,对分解得到的各层高频小波系数进行阈值量化处理;最后,根据最后一层分解的低频小波系数(CA)和经过量化处理后的各层高频小波系数进行信号重构,从而实现信号去噪的目的(小波去噪的具体步骤详见文献[11])。为了更好地从原信号 S 中去除噪声信号,选取合适的小波函数和阈值,确定最优分解层数尤为关键。

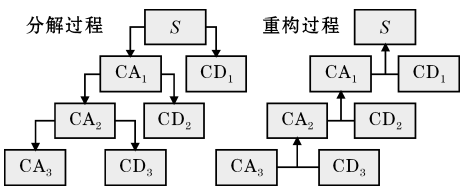


图1 小波分解与重构过程示意图

2 数据资料

所用的大气电场仪资料,来自湖北省防雷中心武汉市(东经 $113^{\circ}41' \sim 115^{\circ}05'$,北纬 $29^{\circ}58' \sim 31^{\circ}22'$)范围内布设的Pre-Storm型大气电场仪2015年6~9月的实际观测资料。该电场仪的探测有效半径为15~20 km,探测精度为 ± 10 V/m,电场强度探测范围为 ± 100 kV/m,采样频率 ≤ 8 ms,其他参数详见表1。其中,电场的正负参照国际标准定义,即当地面电场受雷暴云内的正电荷区控制时,地面电场为负,反之为正^[8]。

表1 Pre-Storm 大气电场仪主要技术指标

性能名称	参数范围
探测有效半径	15 ~ 20 km
探测范围	± 100 kV/m
探测精度	± 10 V/m
采样频率	≤ 8 ms
测量误差	$< 5\%$
输入电压	220 V
功率损耗	3.2 W
温度范围	$-23^{\circ}\text{C} \sim +65^{\circ}\text{C}$
湿度范围	0 % ~ 100 %

3 去噪效果的对比分析

3.1 信号仿真

M. W. Wik 等^[12]将闪电电磁脉冲、核爆炸电磁脉冲和静电电磁脉冲都归纳为双指数衰减型脉冲信号。为了便于研究,仿真雷击时的大气电场信号,其瞬态时域波形为

$$S(t) = A(e^{\frac{t}{\tau_1}} - e^{\frac{t}{\tau_2}}) \tag{3}$$

其中, A 为脉冲的幅值系数, τ_1 、 τ_2 为衰减常数。取 $A = 20$ V/m, $\tau_1 = 1\text{ }\mu\text{s}$, $\tau_2 = 0.2\text{ }\mu\text{s}$,采样频率 $f_s = 60$ Hz。

利用MATLAB工具箱,在仿真大气电场信号上叠加信噪比(SNR)为 n 的高斯白噪声,并选用不同的小波函数、不同的阈值分析法及分解层数,对各自的去噪效果进行对比分析。其中,为了对去噪效果进行更加直观地比较,引入均方误差(MSE)度量信号去噪前后的误差,即:

$$e = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [s_1(k) - s_2(k)]^2 \tag{4}$$

式中: N 为信号长度, s_1 、 s_2 为去噪前后的信号。其中,MSE值越小,表明去噪后的信号与目标信号的相似性越高,即去噪效果越好。

3.2 小波函数与阈值分析法

分别选用Haar小波、db5小波、sym5小波、coif5小波、dmey小波和bior 5.5这6种小波函数及rigrsure、sqtwolog、heursure和minimaxi 4种阈值分析法对各自的去噪效果进行对比分析。如图2所示,rigrsure阈值小波去噪的效果随着噪声信噪比的增大(即噪声能量在信号总能量的占比增大)而减弱,其他阈值分析法也可得到相似的结果(图略)。

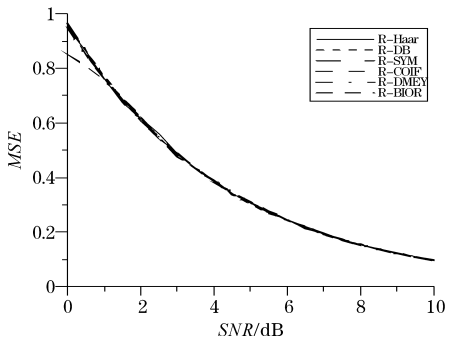


图2 各小波函数的去噪效果随信噪比的变化(rigrsure 阈值法)

图 3 为不同小波函数和阈值分析法的去噪结果 (信噪比取 $n=5$ dB)。从图中不难发现,从整体而言,db5 小波和 sym5 小波的均方误差值要明显小于其他 4 种小波,这说明这 2 种小波的去噪效果更好。与此同时,对于不同的小波函数,采用 rigrsure 阈值分析法的均方误差在 4 种阈值分析法中是最小的,即该阈值法的降噪效果是最好的,其次是 minimaxi 阈值法。综合上述分析,采用 db5 小波或 sym5 小波,并结合 rigrsure 阈值法,能取得较好的去噪效果。

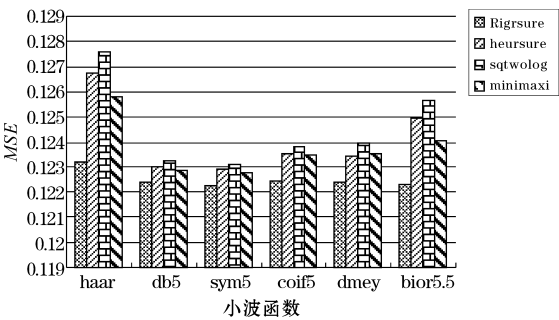


图 3 不同小波函数和阈值分析法的去噪效果比较

箱线图是统计学中常用的显示一组数据分散情况的图形,图 4 为利用 2015 年 6~9 月间武汉地区的 139 个雷击发生样本对 sym5 小波下采用不同阈值分析法对实测大气电场资料的去噪效果进行对比分析的结果。从图中不难发现,在 4 种阈值分析方法中,rigrsure 阈值分析法的去噪效果最稳定,波动最小;且从中位数来看,去噪效果也最好,MSE 值相对最小,这也与仿真信号的分析结果相一致。用其他小波也能得到相同的分析结果(图略)。

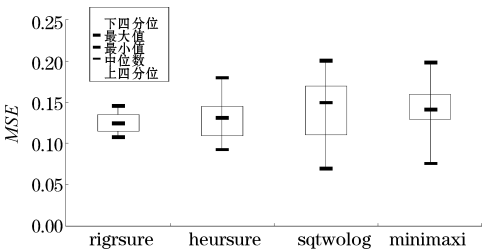


图 4 sym5 小波函数不同阈值分析法的实测信号去噪效果比较

3.3 小波分解层数

大量实验表明,除选用的小波函数和阈值分析方法对去噪效果产生影响,不同的分解层数也明显影

响去噪效果。从大气电场仪信号的特征来看,大气电场的特征信息大多包含在信号的高频部分,即小波分解的细节部分,如果分解层数过少,则降噪效果不明显,且信噪比的提升也有限;反之若分解层数过多,则会造成信息的严重丢失,去噪后的信噪比反而下降,且增大运算量。图 5 为在不同分解层数下对仿真信号进行小波去噪的均方误差计算结果。从图 5 发现,4 层以下的小波分解对信号基本无去噪作用,而随着分解层数的增大,去噪效果越发明显,尤其在 13~17 层之间,均方误差几乎呈线性增长趋势,而在 17 层以后,均方误差趋于平稳。由此可见,实验结果与理论分析相一致,由 2015 年 6~9 月的 26 次雷击过程大气电场仪实测资料的分析结果也可得到相似结论(图略)。其中,不同信号在不同信噪比下都存在降噪效果相对最好的分解层数,这个最优分解层数的选择也就成了决定小波去噪算法性能关键之一。适当的分解层数一般根据信号特性和经验事先选定,但这种固定的分解层数难以在不同信噪比下都获得最优的去噪效果。根据小波变换理论,采用一种分解层数的自适应确定方法^[13-15]。在综合考虑信噪比 SNR 和最小均方误差 MSE 的情况下,该方法得到的小波分解层数所对应的 SNR 和 MSE 最优。

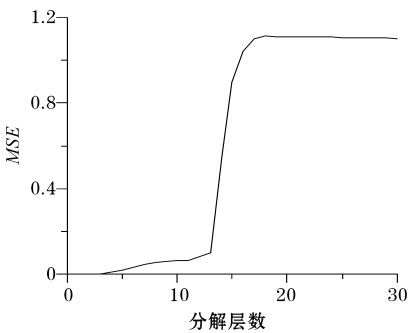


图 5 不同分解层数的仿真信号小波去噪均方误差

3.4 实测信号检验

选取 2015 年 9 月 5 日发生雷击时的大气电场仪资料,分别选用 db5 和 sym5 小波,并通过不同的阈值分析方法及不同的分解层数(5、7、9 层)进行小波去噪,处理效果如图 6、7 所示。其中,自适应确定的最优小波分解层数为 7 层。

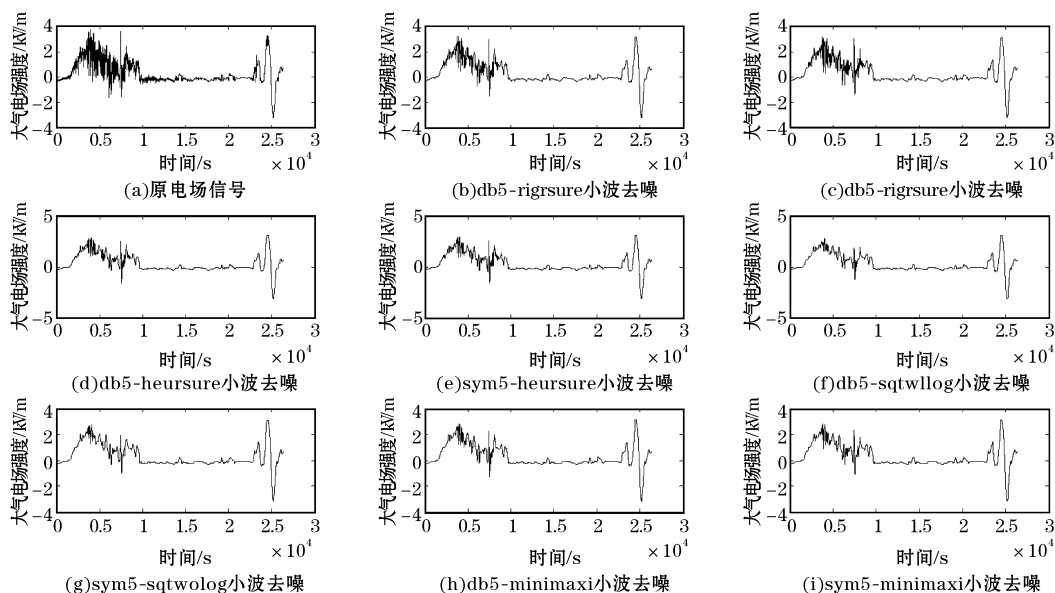


图6 不同小波函数和阈值分析方法的实测大气电场信号小波去噪结果(小波分解层数为7)

由图6可知,相较于原始信号(图6a),各种小波去噪方法对实测大气电场信号都具有较好的去噪效果。但通过对比分析也不难发现,不同阈值分析方法对应的去噪效果还是存在一定差异。rigrsure 阈值法在保留高频波动信息的同时对信号也进行了较好的平滑处理,heursure 阈值法在低频信号的平滑效果上略差;sqtwolog 阈值法则在保留高频信号的同时削弱了一些高频波动的幅度,minimaxi 阈值法去噪后的信号与原信号相似,但仍存在一些噪声干扰。而对于相同的阈值分析方法,db5 小波与 sym5 小波的去噪效果接近,但在局部毛刺的处理方面,db5 小波的处理效果略好。上述结论与仿真信号的实验结论相一致,利用其他个例信号也能得到相似的结论(图略)。

从图7看到,随着小波分解层数的增加,去噪信号的波形变得更加平滑,但一些细节信息也同时被处理掉,而大量研究表明^[2-5],大气电场强度的抖动和突变对预警预报闪电的发生具有较好的指示意义,细节信息的过度处理也将直接影响对这些指示信息的提取和识别。

4 结论

利用大气电场仿真信号和实测信号对不同的的小波函数、阈值分析方法和分解层数的小波去噪效果进行对比分析和研究,通过计算电场信号去噪前后的均方误差得到如下结论:

- (1) 各小波函数的去噪效果随噪声信噪比的增大而减弱。
- (2) 从整体而言,选用 db5 小波或 sym5 小波,并结合 rigrsure 阈值分析法的去噪效果较好;且自适应确定的小波分解层数对应的 SNR 和 MSE 是最优的。
- (3) 利用实测大气电场信号对小波去噪方法进行检验,并得到较好的去噪效果,这也为大气电场信号的后处理及波形突变检测奠定了基础。

参考文献:

- [1] 黄小彦,王学良,李慧. 2000~2006年湖北省雷电灾害时空分布特征分析[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(1): 73-77.
- [2] 孟青,吕伟涛,姚雯,等. 地面电场资料在雷电预警技术中的应用[J]. 气象, 2005, 31(9): 30-33.

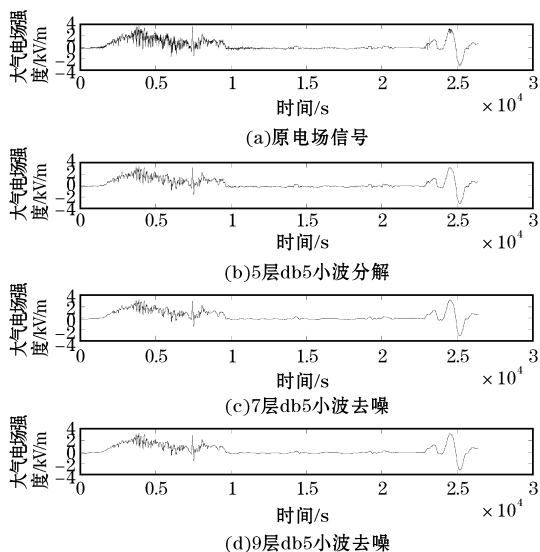


图7 不同小波分解层数下实测大气电场信号小波去噪结果(db5小波)

- [3] 肖正华,惠世德,肖庆复,等. 倒置式大气平均电场仪[J]. 高原气象, 1994, 13(1): 106-112.
- [4] 支凤梅,施丹平,陈飞. 大气电场资料在雷电预报预警中的应用[C]. 第28届中国气象学会年会 S13 雷电物理、监测预警和防护分会场, 2011.
- [5] 许小峰. 雷电灾害与监测预报[J]. 气象, 2004, 30(12): 17-21.
- [6] 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.
- [7] 李振亚,肖稳安,张其林,等. 小波分析在雷击大气电场波形去噪中的应用[J]. 气象科学, 2014, 34(3): 282-287.
- [8] 杨种山. 小波分析及其在瞬态信号波至点检测与去噪中的应用[D]. 西安:西安电子科技大学, 2000.
- [9] 余英林,谢胜利,蔡汉添,等. 信号处理新方法导论[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [10] 张贤达. 现代信号处理:第二版[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [11] 杜牧云,刘黎平,胡志群,等. 双线偏振雷达差分传播相移的小波滤波初探[J]. 暴雨灾害, 2012, 31(3): 248-254.
- [12] Wik M W. Double exponential pulse models for comparison of lightning, nuclear and electrostatic discharge spectral [C]//Proc of 6th Int Symp Tech Exhibition on Electromagnetic Compatibility. 1985:169.
- [13] 刘彬,戴桂平. 基于白化检验和 3σ 准则的小波阈值去噪算法[J]. 传感技术学报, 2005, 18(3): 473-476.
- [14] 蔡铁,朱杰. 小波阈值降噪算法中最优分解层数的自适应选择[J]. 控制与决策, 2006, 21(2): 217-220.
- [15] 杜文辽,朱茹敏,李彦明. 小波滤波分解层数的自适应确定方法[J]. 光电子·激光, 2010, 21(9): 1408-1411.

Research on Wavelet Denosing Method of Atmospheric Electric Field Instrument Data

YU Rong^{1,2}, DU Mu-yun¹, DU Jiu-san³

(1. Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Lightning Protection Center, Wuhan 430074, China; 3. Yichang Meteorological Bureau, Yichang 443000, China)

Abstract: The atmospheric electric field instrument plays an important role in the quantity of electric charge in the monitoring and early warning of lightning, as the only for the clouduninterrupted monitoring system. In this paper, based on the double exponential-decay pulse signal superposition of Gaussian white-noise to simulate the transient electric field signal, and calculate the mean square error of simulation and measured signals before and after de-noising, the de-noising effects with different wavelet functions, threshold analysis methods and decomposition orders are compared. It is concluded that the de-noising effect of db5 or sym5 wavelet with the rigrsure or minimaxi threshold analysis method is good, and the optimal wavelet decomposition order can be adaptive to determine.

Key words: data processing; atmospheric electric field instrument; wavelet de-noising; simulated signal; decomposition order