

文章编号: 2096-1618(2019)01-0022-05

基于小波去噪的称重雨量数据分析

卢勇¹, 卢会国^{2,3}, 蒋娟萍^{2,3}

(1. 中国民用航空飞行学院空管中心, 四川 广汉 618307; 2. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 3. 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225)

摘要: 称重雨量计在测量降雨过程中, 存在风、温度等许多因素的干扰, 导致最后测出的数据质量不理想, 算出的降雨量误差过大。为了提高数据的准确性, 结合噪声干扰的特点, 采用小波分析方法对其进行滤波去噪处理。随机选择一天的称重雨量数据, 通过对比分析确定了小波基函数、分解层数、阈值选取方法和阈值重调方法, 并结合翻斗雨量计数据进行验证, 结果表明, 小波去噪方法能有效去除叠加在称重雨量数据中的噪声, 去噪后的数据变得更为平滑, 信噪比明显提高。同时, 该算法易于实现, 计算量小, 在称重雨量数据的除噪中具有较高的实用价值。

关键词: 信号处理; 称重雨量; 小波滤波; 数据分析; 去噪

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2019.01.005

0 引言

降水是地球系统水热循环以及气候变化研究的重要环节, 作为重要的气象因子之一, 具有时空变化剧烈的特征^[1], 精确地观测降水极具挑战性。降水资料为航空气象部门提供了重要的依据, 它的准确与否很大程度上关系着民航飞机的飞行安全, 不仅如此, 对区域乃至全球尺度的气候和水文研究也是至关重要的^[2]。目前业务中运用较多的是翻斗雨量计, 但它只能测量液态降水。为了解决冰雹、降雪等固态降水的观测问题, 进一步提高降水观测效率, 观测站将逐渐采用称重式雨量计进行全相态的降水观测。

为探究称重雨量数据的准确性, 中国气象局在2006年和2009年共组织两次称重式降水传感器的外场对比试验^[3-4]; 管叶莉等^[5]对称重与人工观测的降水量资料进行了分析, 认为两者之间虽然存在差异但与观测方式无关, 日降水量呈线性相关, 相关系数可以达到0.999; 李林等^[6-7]首先对液态降水进行了分析, 认为在小雨过程中, 称重式传感器与翻斗传感器的观测资料基本一致, 之后对称重式降水传感器观测的固态降水资料与人工观测资料进行了对比分析, 认为两者之间存在差异但相关性很好, 并分析了差异原因并给出了解决办法; 为了评估降水观测的准确性, 世界气象组织(WMO)在不同国家和地区开展了多次对比试验, 并对降水观测资料进行了修正^[8-10]。目前称重式降水传感器已在小范围内使用, 但是很多参考文献只是分析了称重式雨量数据与翻斗雨量计、人工观测的

数据之间的差异与相关性, 并没有对称重雨量数据进行实质的去噪处理, 文中将利用小波分析方法对称重雨量数据进行去噪处理, 并用翻斗雨量计数据进行验证, 比较两者之间存在的差异。

1 观测设备与测量原理

1.1 观测设备

使用基于电阻应变测量技术的称重式降水传感器, 其承水口直径为20 cm, 口径面积为314 cm², 承水口高度为120 cm。为了防止风的干扰, 在安装时, 采用直径为105 cm、高为123 cm的Tretyakov式防风圈^[11]。

1.2 测量原理

称重式雨量传感器利用电子秤称出容器内收集的降水重量, 然后将重量换算成降雨量, 其降水量的换算为

$$h = \frac{m_h - m_0}{\rho \times s} = \frac{m_h - m_0}{\rho \times \frac{\pi D^2}{4}} = \frac{4(m_h - m_0)}{\rho \times \pi D^2} \quad (1)$$

式中: m_h 为当前重量; m_0 为初始重量; $(m_h - m_0)$ 为降水重量; s 为承水口面积; ρ 为水的密度; D 为承水口内径; h 为降雨量。

称重式雨量传感器的承水口直径为20 cm, 0.1 mm的降水相当于3.14 ml, 即是3.14 g, 在气象业务的应用中, 只要降雨分辨率能达到0.1 mm即可满足要求, 而电子秤能达到0.1 g的分辨率, 远远小于3.14 g, 所以从理论上讲, 称重式雨量传感器的测量精度很高。在实际工作中, 称重式雨量传感器每10 s测

收稿日期: 2018-03-13

基金项目: 中国气象局气象探测中心青年基金资助项目(TCQNJJ201208)

量一次,数据输出为 1 次/min,输出的数据为 6 次测量的平均值,在计算某一时段的降水量时,选择相邻两组数据的差值进行累加即可。

2 噪声来源与小波去噪原理

2.1 噪声来源

称重式雨量数据中的噪声主要来源于传感器本身和外界的干扰,主要有以下几个方面:(1)受温度变化的影响,测量电路中的桥接零点、输出和灵敏度会产生不同程度的偏差;(2)仪器自身的电路噪声;(3)在降雨过程中,由于下落有一定的速度,会产生动量影响称重的重量;(4)温度、风等其他因素导致降水的蒸发和湿润损失^[12]。其中最主要的干扰还是温度、风等一系列随机噪声,如何去除这些干扰,得到准确的降雨量至关重要。

由于称重雨量数据在监测过程中常伴有噪声的干扰,式(2)给出了观测数据的组成成分:

$$x(t)=s(t)+n(t)$$

其中, $x(t)$ 为观测数据; $s(t)$ 为有用信号; $n(t)$ 为随机噪声。

2.2 小波去噪原理

小波分析方法弥补了傅里叶分析方法的不足,在图像处理和数据去噪中有着广泛应用,常见的小波去噪方法有:小波分解与重构法、小波阈值去噪法、平移不变量法和小波变换模极大值法^[13],其中阈值去噪方法实现简单、计算速度快、具有广泛的适应性,是众多小波去噪方法中应用最为广泛的一种。阈值去噪方法是通过小波对信号进行分解得到各层系数,然后构造相应的阈值,对大于或小于阈值的系数分别处理,将处理后的小波系数进行重构达到去噪的目的。

文中采集的数据都是离散序列,所以采用离散小波变换(DWT)。在数据序列的时频特性上,噪声信号的分布是全局的,对小波系数的各个尺度都有影响,目标信号的分布是局部的,主要特征集中在比较大的小波系数上,因此只要用合适的阈值对小波系数进行处理,剔除噪声产生的小波系数,同时保留有用信号的小波系数,就可以去除数据中的噪声。称重雨量数据去噪的模型如图 1 所示。

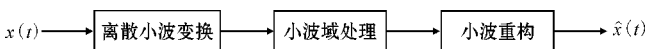


图 1 基于小波分析的信号去噪

3 小波去噪过程分析

3.1 确定小波函数

在小波分析方法中,常见的有 Haar, Daubechies (db), Symlets (sym) 等一系列小波基函数,选择哪种小波基函数对信号进行分解,对去噪效果起着关键作用。在实际的工程应用中,比较常用的是 db 小波系和 sym 小波系,dbN 小波和 symN 小波具有类似的性质^[14]。选用 db 小波系和 sym 小波系对称重雨量数据进行分解去噪处理,由于分解层数、阈值获取和阈值量化都没有确定,在对小波基函数分析时采用控制变量法,默认层数为 4、采用 rigrsure 阈值选取规则、mln 阈值重调方法和软阈值量化方式。利用 2015 年 10 月 8 日 6:00-12:00 的称重雨量数据分析小波函数的选取。

用 db4 小波去噪前后的信号图和 1 min 差值图如图 2 所示。从自动站雨量数据来看,6 h 内没有降水,理想情况下,称重雨量数据的 1 min 差值图应该是一条平滑的曲线,但由于数据受到噪声的干扰波动很大。分别采用 db 小波系和 sym 小波系对称重雨量数据信号进行分解,然后去噪,通过试验分析得知,当消失矩小于等于

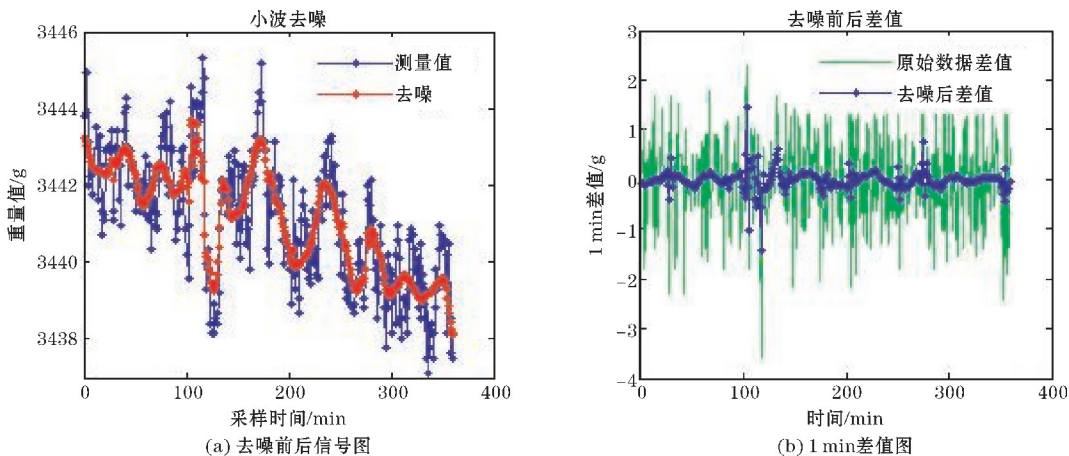


图 2 去噪前后对比

3 时,两种小波的去噪效果几乎完全一样。去噪之前,原数据的1 min差值在-3.57 ~ 2.55波动,除去小于0 的差值,累计6 h的1 min差值达到133.16 g,即累计误差为4.24 mm。当消失矩为4 时,通过 db4 小波去噪后,1 min差值在-1.42 ~ 1.46波动,累计差值为18.43 g,即0.59 mm,随着消失矩的增加,虽然信噪比有所提高,但是 db 小波系的1 min差值和累计误差都在增大,即使没有增大,去噪效果和 db4 小波也基本相同,综合各方面因素考虑,对于 db 小波系来说,选择 db4 小波去噪比较合适。当消失矩为5 时,此时用 sym5 小波去噪,1 min差值在-0.52 ~ 0.40 波动,累计差值为16.74 g,即0.53 mm,且随着消失矩的增大,误差也越来越大,因此对于 sym 小波系来说,选择 sym5 小波去噪比较合适。经过综合分析得出结论:用小波去除称重雨量数据中的噪声时,采用 db4 和 sym5 小波分解去噪效果比较好,在文中均采用 db4 小波去噪。

3.2 确定分解层数

在具体应用中,如果分解层数太少,有用信号中仍是多个时间尺度上信号的混叠,无法有效去除叠加在

其中的噪声信号;如果分解层数较多,较大分解层上会产生一些虚假信息,且计算量更大,会造成误差累积等问题^[15]。选择合适的分解层数,对于去除称重雨量中的噪声非常重要。

同样利用2015 年10 月8 日6 : 00-12 : 00 称重雨量数据分析,当分解层数为6 时,1 min差值在-1.32 ~ 1.43波动,累计差值为15.72 g,即0.5 mm,随着分解层数的增加,1 min差值波动范围略微减小,但不是太明显,所以对于称重雨量数据去噪时,选择分解层数为6 比较合适。

3.3 阈值选取

阈值的大小决定是否除能除去叠加在有用信号中的噪声,因此阈值选择是小波去噪中最为关键的一步。如果阈值太小,有用信号中还残留着许多噪声信息,达不到去噪的效果;如果阈值太大,有用信号也会被去除,使重构后的信号失真。常见的阈值选取方法有4 种:rigrsure、heursure、sqtwolog 和 minimaxi,选择哪种阈值获取方法更合适呢,同样利用2015 年10 月8 日6:00-12:00 的称重雨量数据进行分析。

表1 4 种阈值获取方法的1 min 差值对比

阈值选取方法	1 min 差值最大值/g	1 min 差值最小值/g	1 min 差值大于0 的累计值/g	降雨量/mm
原始数据	2.55	-3.57	133.16	4.24
rigrsure	1.43	-1.31	15.72	0.50
heursure	0.46	-0.51	3.13	0.10
sqtwolog	0.19	-0.22	1.09	0.03
minimaxi	1.17	-1.00	11.16	0.36

从表1 中可以看出,相比其他3 种阈值选取方法,sqtwolog 更适合称重雨量数据的除噪,此时1 min差值在-0.22 ~ 0.19波动,最大变化量是0.19 g,且6 h的累计误差为0.03 mm,完全达到业务上的0.1 mm精度。

阈值重调方法有3 种:one 表示阈值不随噪声水平变化而进行调整,sln 表示根据第一层的系数进行噪声层的估计来调整阈值,mln 表示根据不同层的噪声估计来调整阈值。

表2 3 种阈值重调方法的1 min 差值对比

阈值重调方法	1 min 差值最大值/g	1 min 差值最小值/g	1 min 差值大于0 的累计值/g	降雨量/mm
原始数据	2.55	-3.57	133.16	4.24
one	0.48	-0.34	5.88	0.19
sln	0.90	-1.11	12.94	0.41
mln	0.19	-0.22	1.09	0.03

从表2 中可看出,只有选择 mln 阈值重调方法,即根据不同层的噪声估计来调整阈值时,去噪效果更好。

常用的阈值量化函数主要有硬阈值函数和软阈值函数,软阈值去噪方法得到的小波系数连续性好,和原始信号一样光滑,且估计信号不会产生附加震荡,能够实现均方误差最小化,因此采用软阈值函数进行阈值

量化。

4 去噪结果分析

2015 年10 月8 日自动站雨量数据见表3,其累计降雨量是3.4 mm。称重雨量数据没有去噪之前,对大

于 0 的 1 min 差值进行累加,所得重量为 627.77 g,换算为降雨量是 20 mm,和自动站的降雨量相比误差太大,达到了 488%。现在利用小波去噪方法,对称重雨量

数据进行去噪处理,去噪前后的信号图和 1 min 差值图如图 3 所示。

通过小波去噪后,1 min 差值在 -0.33 ~ 7.35 波动,

表 3 2015 年 10 月 8 日自动站雨量数据(翻斗式雨量计)

时刻	雨量/mm	时刻	雨量/mm	时刻	雨量/mm	时刻	雨量/mm
17:49	0.1	20:14	0.1	21:58	0.1	22:06	0.2
17:51	0.1	20:16	0.1	21:59	0.1	22:07	0.1
18:47	0.1	20:20	0.1	22:00	0.1	22:08	0.1
19:02	0.1	20:23	0.1	22:01	0.1	22:09	0.1
19:38	0.1	20:31	0.1	22:02	0.1	22:12	0.1
20:09	0.1	21:47	0.1	22:03	0.1	22:16	0.1
20:11	0.1	21:56	0.2	22:04	0.2	22:29	0.1
20:12	0.1	21:57	0.1	22:05	0.1	累计	3.4

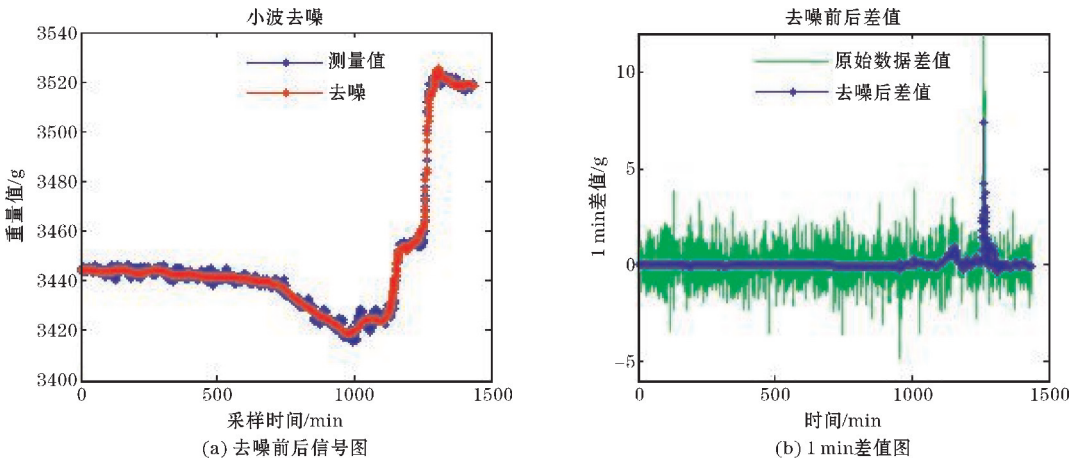


图 3 去噪前后对比

累加大于 0 的 1 min 差值得到 113.39 g,换算为降雨量是 3.6 mm,与自动站的 3.4 mm 相比,误差只有 6%,非常接近。从 1 min 差值图中可以看出,没有降雨时曲线平稳,基本成一条直线,有降雨时曲线有明显的上升趋势,大概在横坐标为 1100 (18:00 左右) 时曲线开始波动上升出现降雨,和自动站上出现降雨的时间基本一致。

5 结论

以 2015 年 10 月 8 日的称重雨量数据为基础资料,通过理论分析、多次对比试验确定了小波基函数、分解层数、阈值以及阈值量化方式,最后用确定的小波分析方法对称重雨量数据进行了去噪处理,与自动站的雨量数据对比,取得了较好的效果,并得到如下结论。

采用无降水称重雨量数据,通过控制变量和对比分析方法,确定了去除称重雨量数据噪声的小波分析方法,即利用 db4 小波、6 层分解、sqtwolog 阈值选取方

法和 mIn 阈值重调方法。
小波分析方法能有效去除称重雨量数据中的噪声,使去噪后的数据更加准确,信号的发展趋势更加明显,而且还能识别有无降雨,累计降雨量与自动站相比很接近,基本满足要求。

在确定小波基函数、层数、阈值选取方法和阈值重调方法时,由于都是变量,在对某一变量进行分析时,都是假定另外 3 项为某个值或某种方法,得到的结论还有待进一步验证;采用的是软阈值量化方式,没有给出更准确的自适应阈值量化函数,如何得到最佳的阈值量化方式,需要进一步分析与推导;给出的分析资料,只是基于一个地区某一天的数据,所得结论有一定的局限性。

参考文献:

[1] 陈圆圆,宋晓东,黄敬峰,等. 基于地面站点观测降水资料的中国区域日降水融合产品精度评价[J]. 自然资源学报,2016,31(6):1004-1013.

- [2] 叶柏生,成鹏,杨大庆,等. 降水观测误差修正对降水变化趋势的影响[J]. 冰川冻土,2008,30(5):717-724.
- [3] 任芝花,李伟,雷勇,等. 降水测量对比试验及其主要结果[J]. 气象,2007,33(10):96-101.
- [4] 王柏林,王经业,任芝花,等. 固体降水自动化观测试验[J]. 气象科技,2009,37(1):97-101.
- [5] 管叶莉,杨保华,李青. 称重与人工观测降水对比分析[J]. 气象水文海洋仪器,2015(2):76-78.
- [6] 李林,范雪波,崔炜,等. 称重与人工观测降水量的差异[J]. 应用气象学报,2015,26(6):688-693.
- [7] 李林,常晨,范雪波,等. 春夏季 DSH1 与 SL3-1 型降水传感器数据比较[J]. 气象科技,2013,41(6):1008-1011.
- [8] Goodison B, Louie P, Yang D. WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison: Final Report [J]. WMO-TD 827, Geneva: WMO, 1998:10-15.
- [9] Sevruck B. Correction of Precipitation measurements [J]. WMO-TD-104, Geneva: WMO, 1985:13-23.
- [10] WMO. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation [J]. Geneva: WMO, 2006: 105-109.
- [11] 中国气象局. 地面气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社, 2003:54-55.
- [12] 牛永红,卢会国,蒋娟萍. 称重式雨量计几种不同滤波方法的效果对比分析[J]. 气象水文海洋仪器,2013(4):21-26.
- [13] 文莉,刘正士,葛运建. 小波去噪的几种方法[J]. 合肥工业大学学报,2002,25(2):167-172.
- [14] 李华,柳云雷,韩冰,等. 天气雷达回波信号去噪中小波分析应用[J]. 气象科技,2015,43(2):196-201.
- [15] 桑燕芳,王中根,刘昌明. 水文序列小波分析中分解层数选择方法[J]. 水文,2012,32(4):1-7.

Analysis of Weighing Rainfall Data based on Wavelet Denoising

LU Yong¹, LU Huiguo^{2,3}, JIANG Juanping^{2,3}

(1. Air Traffic Control Center, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China; 2. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 3. Key Laboratory for Atmospheric Sounding China Meteorological Administration, Chengdu 610225, China)

Abstract: Weighing rain gauge in measuring rainfall, there are many factors interfere with the wind, temperature and so on, leading to the final measured data quality is not ideal, the calculated rainfall error is too large. In order to improve the accuracy of the data, combined with the characteristics of noise interference, wavelet analysis method is used to filter the noise. This paper randomly selected weighing rainfall data, through comparative analysis to determine the wavelet function, the number of decomposition levels, the threshold selection method, and the threshold returning method, and combined with tipping-bucket rain gauge data validation, the result shows that: the wavelet denoising method can effectively remove the noise in the weighing rainfall data, so that the data becomes smoother, and the signal to noise ratio significantly improved after denoising. Meanwhile, the algorithm is easy to implement, small amount of calculation, which is highly applicable in weighing the rainfall data of denoising.

Keywords: signal processing; weighing rainfall; wavelet filtering; data analysis; denoising