

称重式雨量计几种不同滤波方法的效果对比分析

牛永红, 卢会国, 蒋娟萍

(成都信息工程学院电子工程学院, 成都 610031)

摘要: 称重式雨量传感器通过雨水的重量变化计算雨量值。文章在对双流县 2012-07-02 降雨过程的称重式雨量计数据进行处理时, 通过指数平滑法、小波滤波法等几种不同的滤波算法消除随机误差和系统噪声, 最后与自动气象站翻斗式雨量数据进行对比, 结果表明小波算法和指数平滑法可以有效的滤除噪声且与自动站测量的误差最小。

关键词: 称重; 雨量; 干扰源; 滤波算法

中图分类号: P414.9⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-009X(2013)04-0021-06

Comparative analysis on several filtering algorithms of weighing rain sensor

Niu Yonghong, Lu Huiguo, Jiang Juanping

(Electronic Engineering College, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610031)

Abstract: Weighing rain sensor computes the value of the precipitation by rainfall weight change. This paper analyzes the rainfall data obtained by weighing rain sensor on July 2, 2012 in Shuangliu county of Chengdu. By means of several different filtering algorithms including wavelet filter method and exponential smoothing method, the random error and system noise are eliminated. Finally, compared with rainfall data from automatic weather station, the results show that the method of wavelet algorithm and exponential smoothing can effectively remove the noise with the minimum error.

Key words: weigh; precipitation; interference source; filtering algorithm

0 引言

降水包括雨、雹、雪、露、雾凇等。在一段时间内降落到地面的降水总量, 用降水所覆盖的水平地表面的垂直深度来表示(固态降水用水的当量)。

目前国内自动化雨量传感器以翻斗传感器为主, 它主要用于降雨测量, 而对于降雪、冰雹等固体降水的测量曾有许多厂家采用翻斗加热的办法来解决, 但翻斗加热功耗大, 且加热使周围空气温度升高, 气流上升导致雪花很难落入集水器中, 同时蒸发较大, 测量误差大, 无法满足业务需求。称重式雨量传感器相对精度较高、功耗小。美国、挪

威、德国、芬兰有类似的传感器, 但价格昂贵、维护复杂, 采用的盛水口直径与我国的标准不一致, 给计量检定带来不便。目前国内虽有 3 个厂家通过了考核, 但其算法核心处理部分, 都依赖进口。为了有效降低称重式雨量传感器的成本, 有必要也应着力研究, 通过大量实验和有效的模型, 建立一套消除称重雨量数据噪声的滤波算法。

1 工作原理

1.1 降水与称重器的关系

称重式雨量传感器是利用电子秤称出容器内收集的降水重量, 然后换算为降雨量。一般电子

收稿日期: 2013-07-01.

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

作者简介: 牛永红(1988-), 女, 硕士研究生. 主要从事气象探测仪器研究.

秤可以分辨 0.1 g 的重量,气象业务上使用的只要能分辨 0.1 mm 降水的重量即可,因此采用称重式雨量传感器可以达到很高的精度。其降水量的换算公式为:

$$H = \frac{(G_H - G_0)}{\rho \times s} \quad (1)$$

式中: $(G_H - G_0)$ 降水重量; s 为承水口面积; ρ 为水的密度; G_H 为当前重量; G_0 为初始重量; H 为降雨量。

重量计中水的容量与降水量的换算关系为:

$$V = h \times \frac{\pi D^2}{4} \quad (2)$$

式中: V 为水的容量; h 为降水量; D 为承水口内径。

1.2 噪声产生原因

称重式是通过重量的变化来反映降水量的大小,它的传感器灵敏度很高。噪声产生的原因有以下几个方面:

- (1) 蒸发损失和湿润损失。降水的蒸发损失量取决于蒸发时间内的气温以及雨量器器口的风速和饱和差^[1],进而影响称重重量的变化;
- (2) 电阻应变式传感器受温度的影响,温度的变化会影响测量电路中桥接零点和输出和灵敏度;
- (3) 仪器自身的电路噪声和风等随机噪声;
- (4) 降水下落有动量^[2]产生,使得称重受到

干扰。因此,风、温度以及一些随机因素都能引起传感器重量测量的变化,数据会产生波动,如果不加以过滤处理,对测量结果的精度影响较大,如何有效滤除随机因子的影响,并修正温度以及风的影响对测量降水量的精度至关重要。由于称重感应部分是密封在雨量测量仪器内部,风的影响不会使传感器单独重量的增加,只是引起数据的小幅振荡。

2 噪声去除方法

称重式雨量计口径为 200 mm,自然降水 0.1 mm,即可获得降水 31.4 ml 相对于 3.14 g。也就是说要测量 0.1 mm 降水,称重传感器能分辨 1 g 质量即可满足。称重总重量为 12 kg,那么仅相当于万分之二左右,而风以及温度、随机误差的影响每分钟就产生 0~4 g 的变化量,如何区分这些变化量是由降水,还是由于风、温度或者随机误差引起,便是至关重要的。这便涉及到数据的滤波算法,消除误差因子引起的波动,尽量得到真正的降水变化量。

选取 2012-07-02 的 24 h 称重资料,输出数据为 1 次/min,共 1 440 个数据,表 1 是未经温度补偿,也未进行滤波处理的原始数据以及用 excel 处理所得数据的一部分。

表 1 称重式雨量数据

日期	时间	重量	1 min 差值	3 min 平均	3 min 平均差值	k-3	k-10
2012/7/2	00:00:03	3703.93	0	3704.6	0	3703.93	3703.93
2012/7/2	00:01:02	3704.81	0.88	3704.6	0	3704.223	3704.018
2012/7/2	00:02:02	3705.08	0.27	3704.607	0	3704.509	3704.124
2012/7/2	00:03:02	3705.08	0	3704.99	1.15	3704.699	3704.22
2012/7/2	00:04:02	3704.57	-0.51	3704.91	-0.24	3704.656	3704.255
2012/7/2	00:05:02	3705.21	0.64	3704.953	0.13	3704.841	3704.35

噪声来源中,依频率区分,其中温度的影响和自然蒸发属于低频噪声,电源噪声属于高频噪声,风的影响是随机干扰。对于高频噪声通常采用平均法来滤除,低频噪声可通过相邻数据的差值来进行滤除。

叠加在有用数据上的随机干扰,在很多情况下可以近似地认为是白噪声。因为白噪声一个重要的统计特性即其统计平均值为零,所以常采用求平均值的方法来消除随机误差^[3]。但随着数据量增大,全期平均计算量大、延时大,不能满足实时的需求。本文应用了以下几种滤波方法:简单移动平均法、指数移动平均法、加权移动平均法,

小波滤波法。

(1) 简单移动平均法

简单移动平均法认为最近 N 期数据对未来值影响效果都相同,加权为 1;而 N 期以前的数据对未来值毫无影响,加权为 0^[4]。设观测序列为 $y_1, y_2, \dots, y_{t-1}, y_t, \dots$,取移动平均的项数 N 。一次简单移动平均值计算公式为:

$$S_t = \frac{1}{N}(y_t + y_{t-1} + \dots + y_{t-N+1}) \quad (3)$$

(2) 指数平滑法

指数平滑法则兼容了全期平均和移动平均所有的优点,不舍弃过去的的数据,只给予逐渐减弱的

影响程度,即随着数据的远离,权数逐渐收敛为零^[5]。采用一次指数平滑法:设时间序列为 $y_1, y_2, y_3, \dots, y_t, \dots$ α 为加权系数 ($0 < \alpha < 1$), 一次指数平滑公式为:

$$S_t = \alpha y_t + (1 - \alpha)S_{t-1} \quad (4)$$

S_t 即本期 (t 期) 的平滑值; y_t 是 t 期的实际值; S_{t-1} 为 $t-1$ 期的预测值,即上期的平滑值。一次指数平滑就是以第 $t-1$ 期指数平滑值作为 t 期预测值, α 值越大,修正的幅度就愈大,预测模型的灵敏度愈高,一般数据波动不大时, α 应取小一点,如 $0.1 \sim 0.5$,以减少修正幅度^[6]。

(3) 加权移动平均滤波法

简单移动平均法的最大问题是随着随机误差的消除,有用信号的灵敏度也降低。一个 N 项加权平均式为:

$$S_{t+1} = \frac{\sum_{i=1}^t S_i * X_i}{\sum_{i=1}^t X_i} \quad (5)$$

式中: S_{t+1} 是第 $t+1$ 期加权平均值; S_i 是第 i 期实际值; X_i 是第 i 期的权数(权数的和等于 1); t 是本期数。

(4) 小波滤波法

小波滤波,是根据信号和噪声的小波系数在不同尺度上具有不同性质的机理,构造各自相应规则,在小波域采用其他数学方法对含噪信号的小波系数进行处理。小波滤波的一般步骤是:用小波分析先将信号分层,分解得出不同频段的,将信号和噪声进行分离;剔除噪声信号;将经过处理后的信号进行重构,得到真实信号的最优估计。本文采集到的信号都是离散的,所以采用离散小波变换(DWT)。

离散小波变换公式:设 $\varphi(t) \in L^2(R)$, 其傅里叶变换是 $\varphi(\omega)$, 当 $\varphi(\omega)$ 满足下列条件 $C\varphi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\varphi(\omega)|}{|\omega|} d\omega < \infty$ 时,称 $\varphi(t)$ 是一个基本小波,在连续小波中,将 $\varphi(t)$ 经伸缩和平移后,得到:

$$C_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \varphi\left[\frac{t-b}{a}\right] \quad (6)$$

$a, b \in R, a \neq 0$, 称为一个小波序列。其中, a 是伸缩因子, b 是平移因子。离散小波,是把 a, b 即位移和尺度离散化,分别取: $a = a_0^j, b = ka_0^j b_0$, 对应的离散小波函数是:

$$\varphi_{j,k}(t) = a_0^{-\frac{j}{2}} \varphi\left[\frac{t - ka_0^j b_0}{a_0^j}\right] = a_0^{-\frac{j}{2}} \varphi(a_0^{-j} t - kb_0) \quad (7)$$

而离散化小波系数则可表示为:

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) \varphi_{j,k}^* dt = \langle f, \varphi_{j,k} \rangle \quad (8)$$

重构公式是:

$$S(t) = A \sum_{-\infty}^{\infty} \sum_{-\infty}^{\infty} C_{j,k} \varphi_{j,k}(t) \quad (9)$$

式中 A 是一个和信号无关的常数。

3 滤波结果对比分析

以 2012-07-02 的个例,利用称重式雨量计不间断监测,得到 1440 个数据,所得的数据由 2 部分组成,具体模型是:

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (10)$$

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

对于雨量数据而言,短时间的称重变化量是微小的,降水有用信号是弱信号,而误差却呈现为强噪声。这里的有用信号是指由于降水而引起的雨量变化,是真正的降雨量,而噪声是由于风、温度、仪器自身等因素引起的噪声。数据序列中,有用信号和噪声的时频特性通常是不同的,有用信号在时频域上是局部的,表现为低频的信号;而噪声在时频域中的分布是全局性的,在整个观测的时域内处处存在,在频域上常为高频信号。由于噪声在时频域的分布是全局性的,因此简单的利用低通滤波或者高通滤波只能滤除高频部分或者低频部分的噪声信号,不能有效的滤除叠加在低频段或者高频段的噪声。因此,可以采用小波滤波法。

3.1 滤波结果对比

本文中,7月2日的自动站雨量数据见表2,其累计降水量是 3.4 mm。若数据不进行滤波,对每分钟差值大于 0 的值利用公式(2)计算,并计算累计值,所得的降水量是 20.1 mm。简单移动

表 2 2012 年 7 月 2 日自动站雨量数据(翻斗式雨量计)

时间	雨量/mm	时间	雨量/mm	时间	雨量/mm
02:12	0.1	06:23	0.1	14:45	0.1
02:19	0.1	07:25	0.1	14:49	0.1
02:37	0.1	07:35	0.1	14:57	0.1
03:08	0.1	08:51	0.1	15:22	0.1
03:11	0.1	14:25	0.1	15:30	0.1
03:13	0.2	14:27	0.1	15:37	0.1
03:14	0.1	14:30	0.1	15:55	0.1
03:16	0.1	14:32	0.1	16:30	0.1
03:29	0.1	14:35	0.1	19:33	0.1
04:21	0.1	14:37	0.1	20:34	0.1
04:37	0.1	14:40	0.1		
05:42	0.1	14:42	0.1	累计	3.4

平均法采用3 min的数据进行平均,滤波后对每次增加的重量计算,结果为 9.6 mm;一次指数平滑法,分别将 a 取 0.33 和 0.1 滤波,结果如图 1 中 k-3 和 k-10 所示,所得的降水量分别是 8.0 mm 和 4.5 mm,当 a 取 0.1 时滤波效果好于取 0.33;在加权移动平均法中,对相邻的 3 个数据,分别取 $3/6, 2/6, 1/6$ 的权重进行平均,降水量计算结果是 10.8 m。滤波结果如图 1 所示,指数平滑法效果最好,与自动站雨量测量的值误差最小;简单移

动平均法次之,加权移动平均法的滤波效果最差。

在小波滤波法中,在 MATLAB 小波工具箱中提供的小波有 Haar, Symlets (sym), Daubechies(dbN) 等小波基,本次利用 db3 小波基进行 4 层分解,分别采用 Heursure、sqtwolong 和 rigrsure 阈值选取方法及 one、mln 阈值重调方法,对原始数据进行滤波处理。结果如图 1 所示。

从图可以看出:原始数据的抖动很大,受噪声的影响较大,原始信号经过小波滤波处理后,由于

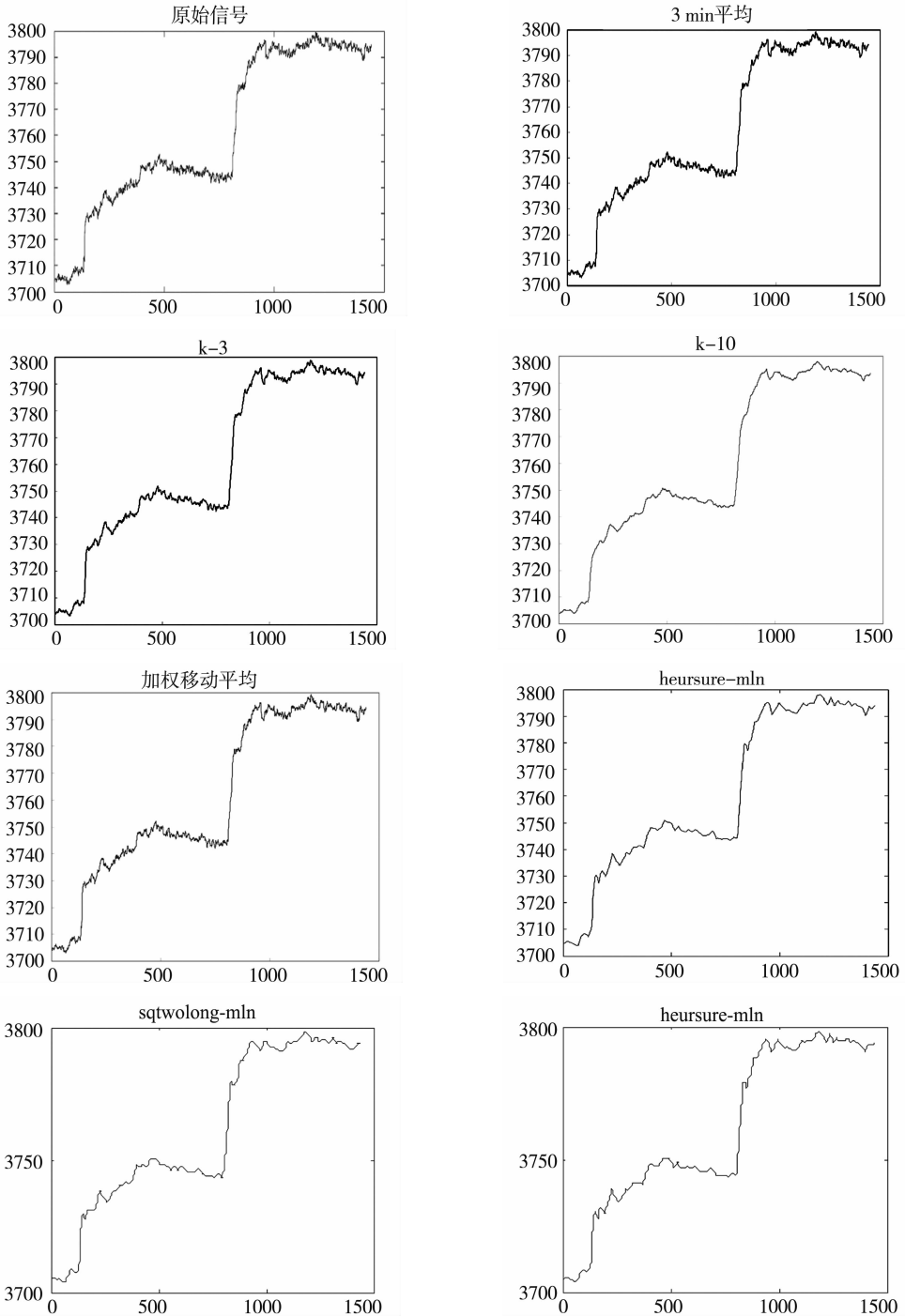


图 1 原始数据、3 min 简单移动平均法、指数平滑法、加权移动平均法和小波滤波后的重构信号图

噪声被过滤掉,重构后的曲线比原始曲线光滑,信号的发展趋势更加明显。其中,sqtwolong-mln 日累计降水量计算结果是 4.4 mm,与自动站累计值 3.4 mm 误差最小,滤波效果最好;Heursure-mln 和 sqtwolong-one 滤波后的降水量计算值同是 4.7 mm;Heursure-one 和 rigrsure-one、rigrsure-mln 计算

结果分别是 5.3 mm,5.6 mm,5.6 mm,滤波效果较差,但优于简单移动平均法和加权移动平均法和 a 值为 0.33 时的滤波效果。

图 2 是原始数据、3 min 简单移动平均法、指数平滑法、加权移动平均法滤波后和小波滤波重构后信号的 1 min 差值图。

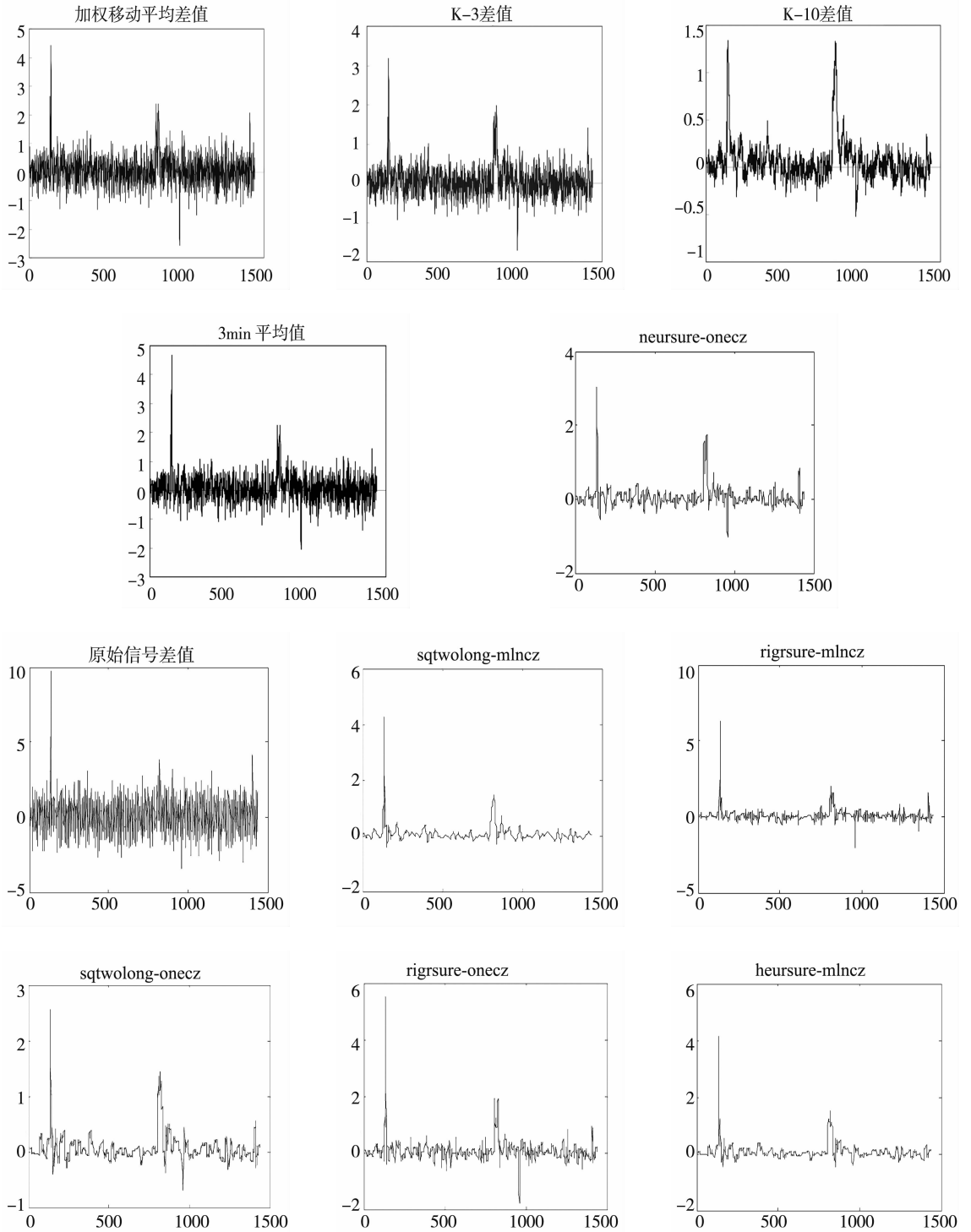


图 2 原始数据、3 min 简单移动平均法、指数平滑法、加权移动平均法滤波后和小波滤波重构后信号的 1 min 差值图

对图 2 进行分析如下:

(1) 原始数据大部分在 $-2.7 \sim 3.1$ 之间波动,最大变化量是 9.7 g ,对比翻斗式雨量的数据,可知当第二次降水发生时,称重数据变化不明显,无法有效的识别噪声与有效信号。

(2) 3 min 平均法的数据在 $-1.2 \sim 1.2$ 之间波动,降水发生时最大变化量为 4.59 g ;在指数平滑中当 a 取 0.33 时,数据大部分在 $1 \sim -1$ 之间波动,当有降水时,数据变化在 $1.5 \sim 3.15$ 之间波动,变化较明显;当 a 取 0.1 时数据的抖动频率和幅度更小,在 $-0.5 \sim 0.5$ 之间,而且当有降水时,降水特征也明显区别于未降水时最大变化量是 1.34 g 。

(3) 加权移动平均法的大部分情况数据在 $-1.3 \sim 1.3$ 之间波动,降水发生时最大变化量是 4.42 g 。对比原始这几种方法,都比原始数据容易判断称重变化量是由降水引起还是由噪声干扰引起,滤波效果明显,但是对于无降水时信号的噪声滤波效果不显著,信号波动较大。

采用 db3 小波基滤波的滤波效果优于上述三种滤波方法,在无降水时,信号波动显著减小且对于降水有效信号可以明显识别判断。信号经过小波滤波经重构后基本不失真,信号的噪声基本上已被滤除,四种滤波方法中小波滤波的效果最好。在上述不同的阈值方法下信号的波动显著减小,幅度基本在 $-1 \sim 1$ 之间波动,其中 sqtwolong-one、Heursure-mln 和 sqtwolong-mln 的波动最小,在 $-0.4 \sim 0.4$ 之间浮动,rigrsure-mln 在这几个小波阈值和重构方法里的数据波动最大。在识别降水有效信号方面,上述几种方法都有效,能显著的识别降水信号,与自动站翻斗式雨量数据对比发现,sqtwolong-mln、Heursure-mln 和 sqtwolong-one

与翻斗式雨量数据最接近,误差最小。

4 结论

通过分析 2012-07-02 日的称重式雨量数据,利用 4 种滤波方法对原始数据进行处理,并与翻斗式雨量数据进行简单对比,得出以下结论:小波滤波法对于全频段的噪声滤波都效果显著,对于称重式雨量数据的噪声可以进行有效的滤除,可以识别噪声和有效的降水信号,其中利用 db3 小波,sqtwolong 阈值选取方法及 mln 阈值重调方法,对于采集的信号滤波效果最好,既能滤除噪声信号,有效信号又能最大限度的不失真,累计降水量与自动站的值误差最小; $a = 0.1$ 时的指数平滑法效果次之。利用小波滤波算法和指数平滑法可以有效提高称重式雨量的精度和准确度。同时也存在一些问题,就是只针对一天的数据进行分析,结果适用的普遍性和应用的广泛性还需进行大量的数据实验和分析,有待进一步的验证。

参考文献:

- [1] 杨大庆. 国外降水观测误差分析及改正方法研究概况[J]. 冰川冻土, 1989(2): 177-183.
- [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(5): 717-725.
- [3] 李梅娟. 微机应用系统中输入信号的数据处理算法[J]. 鞍山师范学院学报, 1997(2): 22-23.
- [4] 许文武, 刘国联. 指数平滑法在服装消费水平预测研究中的应用[J]. 丝绸, 2009(1): 34-35.
- [5] 郭凌. 称重仪表常用数字滤波技术[J]. 衡器, 1998(4): 20-22.
- [6] 李卫国, 高飞, 徐文兵. 基于小波滤波方法在变形监测数据处理中的应用[J]. 铁道勘察, 2007(5): 18-21.

(上接 20 页)

参考文献:

- [1] KROGSTAD H E, BARSTOW S F, HAUG O, et al. Directional distributions in wave spectra[C]//Ocean Wave Measurement and Analysis (1997). ASCE, 1998: 883-895.
- [2] OCEAN WAVES GMBH. Wave monitoring system

operating manual [M]. 3th ed. Lüneburg: Ocean Waves GmbH, 2007.

- [3] REICHERT K, HESSNER K, BORGE J C N, et al. WaMoS II: A radar based wave and current monitoring system[J]. Proceedings of the ninth ISOPE, Brest, France, 1999, 3.