

利用窗口小波去噪的高精度动态单历元定位算法

王德军^{1,2,3} 熊永良¹ 徐韶光¹

1 西南交通大学测量工程系,四川 成都,610031

2 河北工业大学测绘工程系,天津,300401

3 河北省土木工程技术研究中心,天津,300401

摘要:为提高动态单历元定位的精度和实现实时处理,提出了一种利用窗口小波去噪的高精度动态单历元定位算法。该算法首先利用常规单历元方法获得观测值残差,在当前历元右侧通过数据延拓来改善端部效应的影响,然后利用窗口小波对当前历元观测值残差去噪,通过交叉证认实现小波去噪分解层数的自适应选取,最后利用去噪后得到的较为干净的观测值实现最终定位。实验结果表明,与常规单历元定位相比,在不同的运动情况下,该方法的定位精度均有较大的提高,与小波后处理结果一致。

关键词:单历元;动态定位;多路径;小波去噪

中图分类号:P228.41

文献标志码:A

在短基线定位情况下,定位精度主要受测量噪声和多路径的影响。为提高定位精度,可采用小波分析进行去噪处理,文献[1-3]将强制小波去噪应用于变形监测中,该方法保留信号层的小波分解低频系数,部分高频系数置零,这样容易丢失信号中的有用成分;文献[4,5]采用阈值去噪,处理结果受分解层数、阈值函数、阈值大小的影响较大;文献[6,7]利用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)滤波削弱噪声,并根据多路径的周日重复性建立改正模型;钟萍等人^[8]将交叉证认法与 Vondrak 滤波器相组合实现信噪合理分离,达到提高定位精度的目的。

上述在提高精度方面的研究大多是在静态情况下开展的,此时可利用多路径的重复性建立改正模型,戴吾蛟等人的研究表明,天线至信号反射面的距离即使只有 1 cm 的微小变化,也将引起多路径效应较大的变化,此时利用重复性模型改正多路径可能会引入新的误差^[9]。文献[10]的研究认为,动态定位下的多路径由两部分构成,一部分由流动站产生,由于流动站的运动,由其产生的多路径可以认为被随机化,进而当做偶然误差通过滤波来处理;另一部分为由基站产生的低频多路径,其在天与天之间仍有重复性。文献[5]利用窗

口小波对动态观测的双差数据去噪,低频多路径得到了极大的削弱,模糊度解算的可靠性和精度都得到提高。

本文提出了一种基于窗口小波去噪的高精度动态单历元定位算法,该算法利用窗口小波对当前历元观测值残差去噪,通过交叉证认实现小波去噪分解层数的自适应选取。本算法针对列车在轨动态运行的特点,通过附加轨迹约束进行单历元解算,利用宽巷组合波长较长、模糊度比较容易固定的特点,首先固定宽巷模糊度,再利用宽巷模糊度和轨道约束条件,分别固定 L_1 、 L_2 模糊度并进行平差,解算得到观测值残差;当观测历元的个数达到窗口宽度时,利用小波对 L_1 、 L_2 双差观测值残差进行去噪,为防止端部效应,通过比较,选择适合动态解算的延拓方案,在当前历元右侧进行延拓,对延拓后的残差值序列去噪后,从中提取去噪后的残差与原始观测值相加,得到较为干净的观测值,重新解算第一个窗口内所有历元的坐标;之后,观测值每增加一个历元,窗口也随之移动一个历元,在当前历元右侧延拓。与第一个窗口不同的是,去噪后只更正当前历元的双差观测值;利用去噪后的观测值计算当前历元的最终定位结果,可满足动态情况下的实时解算。

收稿日期:2013-11-01

项目来源:国家自然科学基金资助项目(40874015, 41274044, 41104007)。

第一作者:王德军,博士生,讲师,研究方向为 GNSS 动态定位算法及应用。E-mail: schwangdejun@163.com

1 数学模型

1.1 附加轨迹约束的单历元解算算法

将伪距差分平差后的未知数平差值 \hat{x}_1 作为一组权为 P_{X_1} 的虚拟观测值^[11],与轨迹约束条件、宽巷双差相位观测值一起解算^[12],根据平差结果,用LAMBDA方法固定宽巷模糊度。在宽巷模糊度固定后,根据 $N_W = N_{L_1} - N_{L_2}$,将 L_1 、 L_2 观测值的误差方程表达为只含有 L_1 模糊度 N_{L_1} 的形式。结合约

$$\begin{bmatrix} A^T(P_{L_1} + P_{L_2})A & A^T P_{L_1} B_{L_1} + A^T P_{L_2} B_{L_2} & C^T \\ B_{L_1}^T P_{L_1} A + B_{L_2}^T P_{L_2} A & B_{L_1}^T P_{L_1} B_{L_1} + B_{L_2}^T P_{L_2} B_{L_2} & 0 \\ C & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ N_{L_1} \\ K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T P_{L_1} l_{L_1} + A^T P_{L_2} (l_{L_2} + B_{L_2} N_W) \\ B_{L_1}^T P_{L_1} l_{L_1} + B_{L_2}^T P_{L_2} (l_{L_2} + B_{L_2} N_W) \\ W \end{bmatrix} \quad (2)$$

用LAMBDA方法将 L_1 模糊度固定后,回到误差方程中,重新组成法方程,得到最终坐标。

1.2 窗口小波去噪

去噪效果与小波基、阈值函数、阈值、分解层数的选取有关。小波基的选择大多通过试算得到,本文根据文献^[5],所选的小波基为sym8,阈值函数选择硬阈值。阈值的选择相对较宽松,阈值在一定范围内变化时,通常不会导致去噪效果有较大的变化^[17],本文对每层小波系数分别计算中误差,并以3倍中误差作为本层的阈值^[17]。对去噪效果影响最大的是分解层数,分解层数多,容易造成信号信息丢失严重;分解层数少,则去噪效果不理想。文献^[5]在用窗口小波去噪时,未对影响去噪效果的小波的分解层数做出讨论,本文将交叉验证法^[6,18]应用于窗口小波去噪中,通过交叉验证构造的最小均方误差目标函数实现分解层数的自适应选取,并实现动态处理。其基本过程如下。

1) 对当前历元的观测数据按常规单历元方法处理,得到双差观测值残差,当历元的个数达到窗口宽度时,在其右侧进行延拓,对延拓后的观测值序列进行去噪。

2) 将 ω 个观测序列 (t_i, s_i) 分为奇序列 $(t_{1,2m-1}, s_{1,2m-1})$ 和偶序列 $(t_{2,2m}, s_{2,2m})$ 两个样本, $m=1,2,\dots,n_1$ (ω 为偶数时, $n_1=\omega/2$; ω 为奇数时, $n_1=(\omega-1)/2$),将奇数样本作为滤波样本,从偶数样本中进行随机抽样作为验证样本,实验中抽取的样本个数 $n_2=0.2\omega$ 。

3) 选取初始分解层数 l 和小波基,对滤波样本进行小波变换,对每层的小波系数独立地确定一个阈值,利用硬阈值函数进行处理,得到新的小波系数;进行小波逆变换,得到奇序列去噪后的信

息。束条件^[13-16],得到如下数学模型:

$$\begin{cases} V_{L_1} = A\hat{x} + B_{L_1} N_{L_1} - l_{L_1}, P_{L_1} \\ V_{L_2} = A\hat{x} + B_{L_2} N_{L_1} - (l_{L_2} + B_{L_2} N_W), P_{L_2} \\ C\hat{x} = W \end{cases} \quad (1)$$

式中, \hat{x} 为坐标改正数; N_{L_1} 、 N_W 分别为 L_1 、 L_W 的模糊度向量; A 为坐标改正数系数阵; B_{L_1} 、 B_{L_2} 为 L_1 、 L_2 双差模糊度对应的系数阵; l_{L_1} 、 l_{L_2} 分别为 L_1 、 L_2 双差观测值与计算值的差值; P_{L_1} 、 P_{L_2} 分别为 L_1 、 L_2 双差观测值的权阵。其法方程为:

号 f' 。

4) 计算验证样本对滤波值的方差:

$$C(l, P) = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} [s_{2,i} - f'(t_{2,i})]^2 \quad (3)$$

式中, $f'(t_{2,i})$ 是由滤波值 f' 对应于验证样本的时间 $t_{2,i}$ 由三次样条插值内插得到的; P 表示对偶序列的一次随机划分。

5) 对偶序列进行 M 次不同的随机划分,考虑到统计特性和计算效率,本次实验中 $M=20$,得到 M 次划分的方差,并计算其均值:

$$\bar{C}(l, P) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M C(l, P_j) \quad (4)$$

6) 选取不同的分解层数,重复步骤2)、3)、4),方差均值 $\bar{C}(l, P)$ 最小时对应的 l 即为最佳分解层数。由于信号长度和小波基确定了能分解的最大层数,在达到最大分解层数时停止计算。

7) 由于滤波样本的采样率为原始观测序列采样率的一半,则原始观测序列的最佳分解层数为 $l+1$,据此对原始观测序列去噪得到滤波序列,对双差观测值修正,并用其解算窗口内所有历元的最终坐标。

8) 随着观测历元的增加,窗口随之滑动,重复步骤2)到7),对于当前历元 t 的残差的去噪,只用到了从历元 $t - \text{width} + 1$ 到历元 t 之间的残差序列(width 为窗口的宽度),在当前历元的右侧进行对称延拓,将延拓之后的数据小波去噪后,提取当前历元去噪后的残差数据,用其修正原始双差观测值,并解算去噪后的当前历元的坐标,实现实时动态处理。

考虑到采用交叉验证法对数据序列划分的需要和解算的实时性,在本文中,窗口宽度取为512。笔者尝试过1 024、2 048等窗口宽度,其对

最终的处理结果几乎没有影响,但每个窗口选取的分解层数不一样,这也从一个方面说明交叉验证法的自适应性。另外,在计算过程中,为防止端部效应对选取最佳分解层数的影响,仅选取资料序列中部约 70%的数据进行计算。

2 算例分析

本文实验在河北工业大学教师公寓楼顶进行,接收机为合众思壮 E660,采样间隔为 0.2 s,基站与流动站的距离大约为 20 m,如图 1 所示,周围都有较强的反射物,流动站被安置在长约 2.5 m 的直线轨道上,进行连续三天的数据采集,第一天以 0.12 m/s 的速度在轨道上来回运动,第二天以 0.20 m/s 的速度来回运动,第三天以 0.48 m/s 的速度来回运动。设相邻两天的相关延迟为 236 s,连续三天观测的相同时间段的时长为 27 min 21.8 s,共采集 8 210 个历元。



图 1 实验中基站和流动站的分布
Fig. 1 Layout of Base and Rover Stations for the Experiment

2.1 窗口小波去噪下的观测值残差分析

残差序列为有限长信号,小波分解与重构中的卷积运算必然涉及到边界延拓^[19],不同的延拓方法会产生不同的端部效应。当前历元的残差数据处于窗口的最右端,受端部效应的影响最大,本文以小波后处理的观测值残差结果为参照,对补零延拓(zpd)、周期延拓(ppd)、对称延拓(sym)、0 阶平滑延拓(sp0)和 1 阶平滑延拓(sp1)等几种延拓方法做出比较,选择最适合动态数据处理的延拓方案。

连续两天的有效卫星观测数为 8 颗,以高度角最大的 31 号卫星为参考星,组成 7 个双差观测值,按单历元进行计算,得到原始双差观测值残差(记为 Standard 模式),将此残差利用窗口小波去噪,延拓模式分别采用了对称延拓、0 阶平滑延拓、周期延拓、补零延拓和 1 阶平滑延拓,得到去噪后的残差序列,分别记为 WWAV-SYM、WWAV-SP0、WWAV-PPD、WWAV-ZPD、WWAV-SP1 模式。对原始双差观测值序列做小波后处

理,记为 WAV-PP 模式。由于在计算过程中高度角设置为 10°,23 号卫星的高度角最小,在前 1 744 个历元,其高度角小于 10°,未参与解算,残差未能给出,共 6 466 个历元。在以 WAV-PP 模式处理时,为防止端部效应的影响,提取其中间 70%的数据作为其他处理模式的参照。图 2 为第一天 23 号卫星 L_1 观测值残差,为显示方便,图中将各种模式下去噪后的残差序列分别上移了 30 mm。

从图 2 可以看出,相对于其他几种处理模式,原始残差序列(Standard)采用小波后处理(WAV-PP)后,高频部分得到最好的消弱,WWAV-SP1 则引入了更多的噪声,其他两天也有类似的情形。表 1 统计了五种延拓模式以后处理的结果为参照的 RMS 值,可以看出,WWAV-SYM 和 WWAV-SP0 对应的 RMS 值相对较小,与后处理的结果较为吻合。

本文在用 WWAV-SYM 模式处理 L_1 双差观测值残差时,第一天所有窗口的平均分解层数为 3.16,第二天所有窗口的平均分解层数为 3.47,第三天所有窗口的平均分解层数为 3.58,自适应了运动速度快时噪声较大的特点。

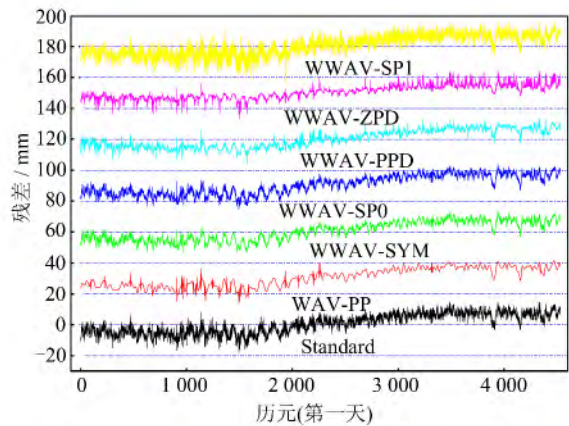


图 2 PRN31-23 的 L_1 载波相位双差观测值在标准模式和窗口小波去噪下的残差

Fig. 2 L_1 Carrier-Phase DD Residuals of PRN31-23 in the Standard and WWAV Strategies

表 1 相对于后处理模式的窗口小波去噪后的 RMS 值/mm

Tab. 1 RMS of Using WWAV Strategies Relative to WAV-PP/mm

	WWAV-SYM	WWAV-SP0	WWAV-PPD	WWAV-ZPD	WWAV-SP1
第一天	1.38	1.41	1.92	2.52	2.85
第二天	1.33	1.39	2.11	2.78	3.41
第三天	1.74	1.88	2.15	2.82	4.37

为检验连续三天残差的重复性,表2给出了标准模式(Standard)、后处理模式(WAV-PP)、对称延拓模式(WWAV-SYM)、0阶平滑延拓模式(WWAV-SP0)下残差的相关系数。可以看出,后处理后,其相关性最高,对称延拓模式和0阶平滑延拓模式下,其相关性也得到进一步提高,这种相关性主要反映的是基站的多路径的重复性。第二天与第三天的相关性低于第一天与第三天的相关性,可能与第二天和第三天的运动速度较快、噪声较大有关。笔者也计算了其他6个双差观测值残差连续三天之间的相关系数,都未超过PRN31-23双差观测值残差的相关系数,其相关系数大多在0.5左右,低于静态模式下观测值残差的相关系数,这为动态模式下利用多路径的重复性建立坐标改正模型带来了困难。

表2 多路径之间的相关系数(PRN31-23)

Tab. 2 Correlation Coefficients Between Multipath Series(PRN31-23)

Day	Standard	WAV-PP	WWAV-SYM	WWAV-SP0
1~2	0.762	0.855	0.837	0.829
2~3	0.652	0.784	0.765	0.744
1~3	0.698	0.832	0.797	0.780

2.2 坐标解算及精度分析

考虑到 WWAV-SYM 和 WWAV-SP0 延拓模式下残差处理效果较好,在随后的窗口小波坐标解算中主要考虑这两种延拓方案。本文也采用了 Kalman 滤波做动态处理,与窗口小波的处理结果进行对比。文中采用了中间 70% 的数据来进行分析(5 748 个历元),设计了以下五种方案进行解算:① 直接采用 L_1 、 L_2 双差观测数据按照常规单历元方法解算。② 在方案①的基础上,对残差采用小波后处理去噪,用去噪后的残差修正原始观测值,再次进行解算。③ 在方案①的基础上,对得到的 L_1 、 L_2 双差观测数据的残差进行窗口小波去噪,采用 WWAV-SYM 延拓模式,用去噪后的残差修正原始观测值,再次进行解算。④ 与方案③类似,所不同的是采用了 WWAV-SP0 延拓模式。⑤ 采用了 Kalman 滤波做动态处理。

为得到精确的轨迹方程,接收机在直线轨道上静态采集了两个点,两点采集时间超过 4 h,在固定基站坐标下,得到该两点的坐标如表 3 所示,高斯平面坐标系下的坐标是在中央子午线 $117^{\circ}03'00''$ 、投影高程面为 28.7 m 的设置下投影得到的。短基线情况下,定位结果主要受测量噪声和多路径的影响,而在长时间观测下,多路径和噪声能得到较好的平滑,可视 A、B 两点的坐标为真实

坐标。用水准测量的方法施测了 A、B 两点的高差与表 3 中的大地高高差相比也是吻合的,最终确定出轨道的坡度是 1.18%。

表3 已知点坐标/m

Tab. 3 Coordinates of Known Sites/m

点名	x	y	h
A	4 344 387.733 8	499 821.625 0	30.573 4
B	4 344 386.558 7	499 822.048 9	30.571 9

由于实验条件的限制,未能获得每个历元的精确平面坐标,通过每个历元在投影平面上偏离直线 AB 的距离来评估其平面精度(下文简称为平面偏差)。AB 的坡度较小,通过每个历元的平面坐标计算出其距端点的距离,可以较为准确地内插出其高程,将其视为真值来评估高程的精度。图 3 是第一天的真误差,为显示方便,将其他方案的 h 真误差分别向上平移了 40 mm。

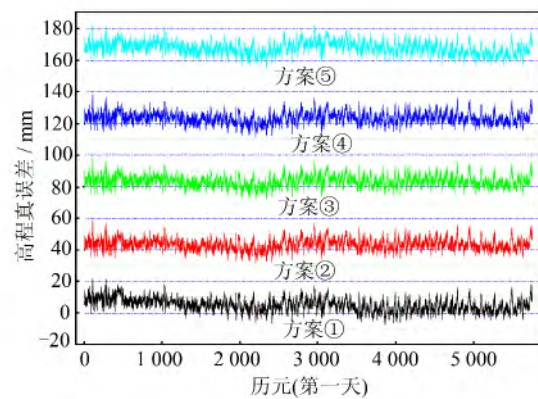


图3 第一天的真误差

Fig. 3 True Error of Height in First Day

表 4 统计了连续三天五种不同方案的平面偏差序列和高程真误差序列的 RMS 值,在第一天,方案①的平面偏差 RMS 值为 2.65 mm, h 为 6.54 mm 左右;在第二天和第三天,其 RMS 值出现一定程度的增加,这可能与随着流动站运动速度的提高,周围环境变化快,导致多路径误差快速变化有关。采用两种不同延拓方式的窗口小波处理结果与小波后处理结果非常一致,采用 Kalman 滤波处理的结果(方案⑤)比常规单历元的结果(方案①)还要差,这可能是由于动态测量时测量噪声大,之前历元的数据对当前历元的精度没有起到改善作用。

2.3 坐标真误差序列的重复性检验

在基站多路径的影响下,其残差序列具有一定的重复性,为检验其真误差序列是否也具有一定的重复性,计算了方案③的相邻两天的真误差的相关系数。第一天与第二天的相关系数为

0.079,第二天与第三天的相关系数为 0.114,其相关性都不高,这主要是由于真误差是受到残差的综合影响,而残差序列的相关性本身就不高,必然导致真误差的相关性不高。

表 4 三种不同方案的真误差序列的 RMS 值

Tab.4 RMS of True Error Series Using Three

Different Schemes					
Day	方案	平面 /mm	提高 百分比/%	高程/mm	提高百 分比/%
1	①	2.65	-	6.54	-
	②	2.26	14.72	4.95	24.31
	③	2.24	15.47	4.98	23.85
	④	2.25	15.09	4.96	24.16
	⑤	2.94	-10.94	8.86	-35.47
2	①	2.64	-	7.79	-
	②	2.21	16.29	6.06	22.21
	③	2.19	17.05	6.04	22.46
	④	2.20	16.67	6.05	22.34
	⑤	2.86	-8.33	9.96	-27.86
3	①	2.86	-	8.19	-
	②	2.33	18.53	6.28	23.32
	③	2.30	19.58	6.28	23.32
	④	2.31	19.23	6.25	23.69
	⑤	3.26	-13.99	10.83	-32.23

注:RMS改善的百分比是相对于当天的第一种方案计算得到的。

3 结 语

1) 通过交叉证认自适应地选择最佳分解层数,利用窗口小波对残差去噪,去噪效果受窗口长度的影响不大。在接收机以 0.48 m/s 运动的情况下,利用方案③得到平面偏差的 RMS 为 2.30 mm, h 方向的 RMS 为 6.28 mm,比方案①有了明显的提高。

2) 采用对称延拓或者 0 阶延拓对端部效应有比较好的改善,与小波后处理结果较为一致。

3) 动态定位情况下,其观测值残差序列仍然有一定的重复性,由于流动站的快速移动,导致重复性不高,这种重复性主要反映的是基站多路径的重复性。由于最终的坐标受到多个残差的综合影响,导致坐标真误差序列的重复性很差,此时利用天与天之间的重复性改正可能会引入更多的误差。

4) 如何提高高程方向上的定位精度,以便拓展动态单历元定位的应用领域,是下一步将要开展的工作。

参 考 文 献

[1] Xiong Yongliang, Ding Xiaoli, Huang Dingfa, et

al. Integrated Single Epoch Algorithm Based on Wavelet Transform and Its Application to Structural Vibration Monitoring [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2005, 34(3): 202-207(熊永良, 丁晓利, 黄丁发, 等. 基于小波变换的单历元算法及其在结构振动监测中的应用研究[J]. 测绘学报, 2005, 34(3):202-207)

[2] Zhong P, Ding X L, Zheng D W. Adaptive Wavelet Transform Based on Cross-validation Method and Its Application to GPS Multipath Mitigation [J]. *GPS Solut*, 2008, 12(2):109-117

[3] Huang Shengxiang, Li Peihong, Yang Baocen, et al. Study on the Characteristics of Multipath Effects in GPS Dynamic Deformation Monitoring [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(10):877-880(黄声享, 李沛鸿, 杨保岑, 等. GPS 动态监测中多路径效应的规律性研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(10): 877-880)

[4] Souza E M, Monico J F G. Wavelet Shrinkage: High Frequency Multipath Reduction from GPS Relative Positioning [J]. *GPS Solut*, 2004, 8(3): 152-159

[5] De Souza E M, Monico J F G, Polezel W G C, et al. Spectral Analysis and Low-Frequency Multipath Mitigation for Kinematic Applications [C]. *Proceedings of the IEEE/ION PLANS*, Monterey, CA, 2008

[6] Luo Feixue, Dai Wujiao, Wu Xixiu. EMD Filtering Based on Cross-Validation and Its Application in GPS Multipath [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(4): 450-453(罗飞雪, 戴吾蛟, 伍锡锈. 基于交叉证认的 EMD 滤波及其在 GPS 多路径效应中的应用 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(4): 450-453)

[7] Dai Wujiao, Ding Xiaoli, Zhu Jianjun, et al. EMD Filter Method and Its Application in GPS Multipath [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2006, 35(11): 321-327(戴吾蛟, 丁晓利, 朱建军, 等. 基于经验模式分解的滤波去噪法及其在 GPS 多路径效应中的应用 [J]. 测绘学报, 2006, 35(11):321-327)

[8] Zhong Ping, Ding Xiaoli, Zheng Dawei. Study of GPS Multipath Effects with Method of CVVF [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2005, 34(2): 161-167(钟萍, 丁晓利, 郑大伟. CVVF 方法用于 GPS 多路径效应的研究 [J]. 测绘学报, 2005, 34(2):161-167)

[9] Dai Wujiao, Ding Xiaoli, Zhu Jianjun. Study on Multipath Effect in Structure Health Monitoring U-

- sing GPS[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2008, 28(1):65-71(戴吾蛟, 丁晓利, 朱建军. GPS 动态变形测量中的多路径效应特征研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(1):65-71)
- [10] Zhang Q J, Schwarz K P. Estimating Double Difference GPS Multipath Under Kinematic Conditions[C]. IEEE Position Location and Navigation Symposium, Atlanta, GA, 1996
- [11] Liu Genyou, Ou Jikun. Kinematic Positioning Algorithm with Coordinate Function Constraint [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(5):389-393(刘根友, 欧吉坤. 具有坐标函数约束的动态定位算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(5):389-393)
- [12] Zhu Huizhong, Gao Xingwei, Xu Aigong, et al. Single-Epoch Ambiguity Resolution for Network RTK Rovers[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010, 35(2):77-79(祝会忠, 高星伟, 徐爱功, 等. 网络 RTK 流动站整周模糊度的单历元解算[J]. 测绘科学, 2010, 35(2):77-79)
- [13] Xiong Yongliang, Huang Dingfa, Zhang Xianzhou. A Reliable GPS Single Epoch Processing Algorithm with Known Deformation Interval Constraints [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(1):51-56(熊永良, 黄丁发, 张献洲. 一种可靠的含有约束条件的 GPS 变形监测单历元求解方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(1): 51-56)
- [14] Han Baomin, Ou Jikun. A GPS Single Epoch Phase Processing Algorithm with Constraints for Single-frequency Receiver[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2002, 31(4): 300-304(韩保民, 欧吉坤. 一种附约束的单频单历元 GPS 双差相位解算方法[J]. 测绘学报, 2002, 31(4):300-304)
- [15] Dai Wujiao, Zhu Jianjun, Ding Xiaoli, et al. Single Epoch Ambiguity Resolution in Structure Monitoring Using GPS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(3): 234-241(戴吾蛟, 朱建军, 丁晓利, 等. GPS 建筑物振动变形监测中的单历元算法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(3): 234-241)
- [16] Tang Weiming, Sun Hongxing, Liu Jingnan. Ambiguity Resolution of Single Epoch Single Frequency Data with Baseline Length Constraint Using LAMBDA Algorithm[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(5): 444-446(唐卫明, 孙红星, 刘经南. 附有基线长度约束的单频数据单历元 LAMBDA 方法整周模糊度确定[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(5): 444-446)
- [17] Zhang Jixian, Zhong Qiuhai, Dai Yaping. The Determination of the Threshold and the Decomposition Order in Threshold De-noising Method Based on-Wavelet Transform[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(2):118-122(张吉先, 钟秋海, 戴亚平. 小波门限消噪法应用中分解层数及阈值的确定[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2):118-122)
- [18] Zhong Ping, Ding Xiaoli, Zheng Dawei, et al. An Adaptive Wavelet Transform Based on Cross-validation and Its Application to Mitigate Multipath Effects [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36(3): 279-285(钟萍, 丁晓利, 郑大伟, 等. 一种基于交叉认证技术的自适应小波变换及其在消减 GPS 多路径误差中的应用[J]. 测绘学报, 2007, 36(3):279-285)
- [19] Donoho D L, Johnstone I M. Wavelet Shrinkage: Asymptopia[J]. *Journal of Royal Statistics Society Series (B)*, 1995, 57:301-369

A Precise Kinematic Single Epoch Positioning Algorithm Using Moving Window Wavelet Denoising

WANG Dejun^{1,2,3} XIONG Yongliang¹ XU Shaoguang¹

1 Department of Surveying Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

2 Department of Surveying Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

3 Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China

Abstract: In order to improve kinematic single epoch positioning accuracy and realize real-time processing, the article presents a precise kinematic single epoch positioning algorithm using moving window wavelet denoising. Firstly, we obtain the observation residuals by using the conventional single epoch method and improve end effect by data extending a part of the current epoch. Secondly, we

(下转第 852 页)

Annual Update Method for Grading Cultivated Land Quality

ZHANG Yajie¹ DUAN Changbai¹ YUAN Yong¹ He Fafa¹

¹ School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Annual updating of land quality grades is the foundation of cultivated land quantity control and quality management. It is also an important way to achieve integrated cultivated land management objectives for quantity, quality, ownership and price. This paper puts forward a technical means for cultivated land quality grade updates, pointing out the key steps and implementation points such as differentiating variation types, ascertaining the quality alteration range, establishing evaluation index system and assigning the grading factors. Then, taking Gong'an County in Hubei province, a state-level experimental unit, as a case study, we found that the proposed method for cultivated land quality grade updating under different variation types were effective. In the final analysis, experimental site implementation problems and suggestions are discussed.

Key words: cultivated land; quality grade; annual update; gradation on agriculture land; land evaluation

First author: ZHANG Yajie, associate professor, PhD, specializes in land use planning and land evaluation. E-mail: zhangyajie5549@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41171312.

.....
(上接第 784 页)

denoise the current epoch observation residuals using a window wavelet, and achieve an adaptive selection of the wavelet decomposition level for denoising through cross-validation. Finally, we achieve final positioning accuracy using the clean observations, after denoising. Comparing the proposed method with conventional single epoch positioning, experimental results show that positioning accuracy has been improved greatly for different motions. The results were consistent with those from wavelet post processing.

Key words: single epoch; kinematic positioning; multipath; wavelet denoising

First author: WANG Dejun, PhD candidate, lecturer, specializes in algorithm and application of GNSS kinematic positioning. E-mail: schwangdejun@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 40874015, 41274044, 41104007.