

# 基于北斗系统的提高桥梁变形监测精度 方法研究

包龙生<sup>1</sup>,张子轩<sup>1</sup>,沈志<sup>1</sup>,包宇扬<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 辽宁省交通高等专科学校道路与  
桥梁工程系,辽宁 沈阳 110000)

**摘要** 目的 研究 RTK 相对静态定位技术来提高北斗系统在桥梁变形监测上的测量精度。方法 分析北斗导航系统的定位误差来源,对多种消除误差的方法进行对比研究。研究在卫星信号传播过程中的周跳现象,对传统 TurboEdit 法进行分析,建立一种平均滑动的算法对 TurboEdit 法进行改进。结果 传统方法在测点 1X 方向上差值的平均值为 1.02 cm,在 Y 方向上差值的平均值为 0.98 cm;在测点 2X 方向上差值的平均值为 1.14 cm,在 Y 方向上差值的平均值为 1.13 cm。改进后的方法在测点 1X 方向上差值的平均值为 0.59 cm,在 Y 方向上差值的平均值为 0.59 cm;在测点 2X 方向上差值的平均值为 0.78 cm,在 Y 方向上差值的平均值为 0.78 cm。结论 改进后的算法在监测过程中能使北斗系统测量误差控制在 1 cm 以内,基本可以满足高精度变形监测的要求。

**关键词** 北斗系统;电离层;模糊度;周跳;静态监测

中图分类号 TU279.7;U448.27 文献标志码 A

## Research on Improving Precision of Bridge Deformation Monitoring Based on Beidou System

BAO Longsheng<sup>1</sup>,ZHANG Zixuan<sup>1</sup>,SHEN Zhi<sup>1</sup>,BAO Yuyang<sup>2</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Department of Road and Bridge Engineering, Liaoning Provincial College of Communications, Shenyang, China, 110000)

**Abstract:** The Beidou navigation system developed by our country is used in the field of bridge monitoring to get rid of the dependence on the GPS system and to study relative static positioning technology to improve the measurement accuracy of Beidou system in bridge deformation monitoring. The source of positioning error of Beidou navigation system is analyzed. A

收稿日期:2019-10-14

基金项目:“十三五”国家重点研发计划重点专项基金项目(2018YFC0809600,2018YFC0809606);辽宁省重点研发计划指导计划基金项目(2018416028);沈阳市建委城乡系统科研项目(201804)

作者简介:包龙生(1971—),男,教授,博士,主要从事桥梁工程结构方面研究。

comparative study of various methods for eliminating errors. The cycle slip phenomenon in the process of satellite signal propagation is studied. The traditional TurboEdit method is analyzed, and an average sliding algorithm is established to improve the TurboEdit method. By analyzing the measured data, the improved algorithm can truly reflect the propagation distance of the signal and accurately detect the position of the cycle slip phenomenon. Taking a bridge as an example, the improved algorithm and the traditional algorithm are compared and analyzed, and examples are monitored. In the conventional method, the average value of the difference in the 1X direction of the measuring point is 1.02 cm, and the average value of the difference in the Y direction is 0.98 cm; the average value of the difference in the 2X direction of the measuring point is 1.14 cm, which is in the Y direction. The average value is 1.13 cm. The improved method has an average value of 0.59 cm in the 1X direction of the measuring point, and an average value of 0.59 cm in the Y direction; the average value of the difference in the 2X direction of the measuring point is 0.78 cm in the Y direction. The average value of the upper difference is 0.78 cm. The improved algorithm can keep the measurement error of Beidou system within 1 cm in the process of application, and the monitoring accuracy can reach millimeter level, which can meet the requirements of high-precision deformation monitoring. Beidou system can be applied to more complex terrain to prepare for the further realization of real-time automatic high-precision monitoring.

**Key words:** Beidou system; ionosphere; ambiguity; cycle slip; static monitoring

随着我国经济技术的不断发展,道路桥梁等基础设施建设也得到大规模发展,当前重新建设大、中、小等各种形式的桥梁近20万座,各种斜拉桥、悬索桥等大跨径桥梁不断建成,使我国成为世界上的桥梁大国<sup>[1]</sup>。在桥梁使用的过程中会受到各种自然因素和人为因素的影响,导致桥梁结构发生变形,当变形超过一定程度就会发生破坏,导致严重灾害和事故发生。为了预防这些灾害的发生,对桥梁进行监测就显得十分重要。

最近几十年,随着科学技术的不断进步,应用卫星进行桥梁监测成为研究热点,国内外许多的桥梁都采用了卫星监测技术。1997年 I. Daniele 等<sup>[2]</sup>对英国亨伯大桥利用 GPS 进行了变形监测,但是测量结果不够准确。2000年 H. H. Handayani 等<sup>[3]</sup>对亨伯大桥采用 GPS 技术进行风载测量和车载测量试验,证明了使用卫星监测技术在桥梁监测上使用的可行性。我国首次进行 GPS 桥梁监测是在1999年的广东虎门大桥上<sup>[4]</sup>。2012年在广东珠江黄埔大桥交通部公路科学研究院利用北斗/GPS 技术进行监测,这是北斗系统

第一次在桥梁监测上使用<sup>[4]</sup>。

我国现有的桥梁监测系统大多采用 GPS 技术,而使用我国自主研发的北斗导航系统非常少。为了摆脱对 GPS 系统的依赖,笔者通过研究 RTK 相对静态定位技术来提高北斗系统在桥梁变形监测上应用的测量精度。首对北斗系统在监测过程中可能产生的误差来源进行分析,研究在卫星信号传播过程中可能会产生的周跳现象,提出了一种可以探测并修复周跳的改进算法,并进行理论分析,最后通过桥梁监测实例验证北斗系统在桥梁变形监测领域应用的可行性。

## 1 北斗系统测量误差分析

在使用伪距和载波相位的方法进行测量值时,在测量值里一般含有各种误差。按照误差的来源可分为6种<sup>[5-6]</sup>:①卫星和接收机的钟差;②卫星星历的误差;③电离层延时;④对流层延时;⑤接收机噪声;⑥多路径效应。

### 1.1 卫星和接收机的钟差

钟差是卫星上的高精度原子钟随着时间

的推移发生老化而使计时发生频率偏移和时间偏差所导致的误差,只有卫星的时间和接收机的时间完全一致才能实现高精度测量。钟差的产生对相位和载波相位测量都会有非常大的误差产生,通过采用钟差修正模型可以消除卫星钟差<sup>[7]</sup>。

### 1.2 卫星星历的误差

星历是定义卫星的准确位置和运行速度大小的,卫星的运行位置和速度与星历所定义的偏差被称作星历误差。星历误差产生的原因是由于卫星在实际运动过程中会受到地球重力、地球内部活动等方面的影响,使卫星实际的运行轨道与星历中的轨道不同而造成误差。消除星历误差的方法有多种,主动忽略轨道误差,适用于需要实时定位的测量;采用对轨道进行处理过的观测数据,适用于对测量精度要求较高的测量;采用差分技术<sup>[8]</sup>,也可以减弱由星历误差造成的影响。

### 1.3 电离层延时

电离层是大气层最外层,直接受到太阳辐射的作用,使大气发生电离作用。电离层会对电磁波的传输产生折射、散射等现象,还会使电磁波损失一部分能量,从而延长了传播时间并且改变了传播方向,由此使接收机在接收信号时产生误差。消除电离层的影响可以使用电离层模型来消除电离层延时误差,使用双频接收机也可以消除电离层的延时误差,当基线较短时,使用差分技术就可以很好地减小或消除电离层的延时<sup>[9-10]</sup>。

### 1.4 对流层延时

对流层是大气中最靠近地面的一层,它包含了大气中75%的质量。电磁波在对流层传播的过程中不受色散介质的影响,但是当卫星与地面的夹角比较小时,电磁波在对流层的传播过程中会发生大角度的折射,增大了对流层的延迟。对流层的延迟只能通过数学模型来修正<sup>[11]</sup>。

### 1.5 接收机噪声

接收机的噪声包括了环境中各种通信信

号、热辐射、其他种类的电器产生的电磁波、卫星之间的信号互相干扰、接收机本身的计算误差等。接收机噪声的误差来源有很多,很难进行分析和判断<sup>[12]</sup>。在观测方程中,每个接收机都有各自的噪声参数。

### 1.6 多路径效应

卫星在发出信号后会传播很长一段距离,在这个过程中信号不只是从卫星直接传播到接收机,卫星信号还会受到大气层的折射与反射或者表面光滑的建筑物所反射回来。接收机不光会收到直接传输信号,还会收到经由反射而来的信号,这种现象叫做多路径效应<sup>[13]</sup>。在实际传播过程中,多路径有多重传播方式和组合方式,周围的环境在不断产生变化则更会加剧组合的复杂性,多路径效应变得更加随机。多路径效应在观测方程中也有固定的参数<sup>[14]</sup>。

## 2 周跳现象的探测与修复

周跳现象是载波相位信号在接收信号的过程中因为其他原因所导致的信号接收中断,使观测数据在整周数处失去一些记录的现象<sup>[15]</sup>。周跳现象的出现有多种原因:一是由于载波相位信号在传播过程中由于建筑物的遮挡造成无线电信号的中断导致;二是由于信号经过地球电离层或多路径干扰等,导致信号接收失败;三是由于接收机自身的原因处理数据失败造成的。周跳的出现导致发生信号中断处前后的模糊度值不一致,从而无法进行精确定位。周跳的出现会影响之后数据的计数,并不断累积偏差<sup>[16]</sup>。

现阶段对周跳的探测与修复的方法有很多,其中应用最多的就是 TurboEdit 法<sup>[17]</sup>,它是共同使用卫星信号的 MW (Melbourne-Wübbena) 组合和 GF (Geometry-Free) 组合来对周跳进行探测和修复的。运用 MW 组合可以解决几何误差项、电离层延迟等造成的影响。在能够精准地探测周跳现象出现的位置后,就能够根据余下参数间的数学关系

来对周跳进行修复,在综合运用 MW 组合和 GF 组合在对周跳进行探测时还可以对测量结果进行互相补充。

2.1 宽巷组合法

载波相位的宽巷组合为

$$L_{\delta} = \frac{f_1 L_1 - f_2 L_2}{f_1 - f_2} = \tau + K \cdot \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} + \lambda_{\delta} d_{\delta}.$$
  
(1)

对应的伪距组合为

$$P_{\delta} = \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} = \tau + K \cdot \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2}.$$
  
(2)

式中:  $L_1$  和  $L_2$  为变换成长度单位的载波相位值;  $P_1$  和  $P_2$  为进行伪距观测得到的结果;  $\tau$  为卫星之间的距离、钟差、对流层延迟等数据的延迟;  $K$  为电离层对信号传播过程造成的影响; 卫星信号传播频率  $f_1 = 154 \times 10.23 \text{ MHz}$ ,  $f_2 = 120 \times 10.23 \text{ MHz}$ ;  $\lambda_{\delta}$  为宽巷组合的波长,  $\lambda_{\delta} = \frac{c}{f_1 - f_2} \approx 86.2 \text{ cm}$ ;  $d_{\delta}$  为宽巷组合的模糊度,  $d_{\delta} = d_1 - d_2$ , 其中  $d_1$ 、 $d_2$  分别为  $f_1$ 、 $f_2$  频率上的模糊度。

由式(1)、式(2)可以求出  $d_{\delta} = \frac{L_{\delta} - P_{\delta}}{\lambda_{\delta}}$ 。

宽巷长波组合能够减小接收机本身的钟差误差、电磁波在电离层转播过程中产生的延迟误差以及卫星原子钟的钟差误差。从卫星传播信号的方式中得到均方根中误差的规律,然后根据式(3)求得每一历元的宽巷模糊度并取平均值  $\bar{d}_{\delta}(i)$ ,进而求出本历元的方差。

$$\bar{d}_{\delta}(i) = \bar{d}_{\delta}(i-1) + \frac{1}{i} [d_{\delta}(i) - \bar{d}_{\delta}(i-1)] \sigma^2(i) = \sigma^2(i-1) + \frac{1}{i} [(d_{\delta}(i) - \bar{d}_{\delta}(i-1))^2 - \sigma^2(i-1)].$$
  
(3)

若  $\begin{cases} |d_{\delta}(i) - \bar{d}_{\delta}(i-1)| \geq 4\sigma(i-1) \\ |d_{\delta}(i) - d_{\delta}(i+1)| \leq 1 \end{cases}$ , 则

说明在第  $i$  个历元产生周跳现象。

2.2 电离层组合法

载波相位电离层残差组合:

$$L_1 = L_1 - L_2 = N + \lambda_1 d_{\delta} - \lambda_2 d_2.$$
  
(4)

伪距电离层残差组合:

$$P_J = P_2 - P_1 = J.$$
  
(5)

式中:  $\lambda_1$  为窄巷波长,  $\lambda_J = \lambda_2 - \lambda_1 \approx 5.4 \text{ cm}$ ;  $J$  为电离层延迟。

两式相减后,可以得到电离层残差组合方程为

$$\Delta L_J = L_J - P_J = \lambda_1 d_{\delta} - \lambda_J d_2.$$
  
(6)

因为在伪距观测里有很多的观测噪声,因此在伪距电离层残差组合法中,上式的伪距电离层残差组合  $P_N$  用  $Q$  代替,其中多项式  $Q$  的阶数  $m$  符合下列条件:

$$m = \min \left[ \left( \frac{N}{100} + 1 \right), 6 \right].$$
  
(7)

其中,  $N$  为观测历元总数。

如满足:

$$\begin{cases} |[L(i) - Q(i)] - [L(i-1) - Q(i-1)]| > 6(\lambda_2 - \lambda_1) \\ |[L(i) - Q(i)] - [L(i+1) - Q(i+1)]| < (\lambda_2 - \lambda_1) \end{cases},$$
 则说明在

第  $i$  个历元出现了周跳现象。

2.3 周跳修复

如果在两个频率上,周跳发生前模糊度是  $d1$  和  $d2$ ,周跳发生后的模糊度为  $d^*1$  和  $d^*2$ ,那么两个频率在周跳发生前后的模糊度之差就可以表示为  $\Delta d1$  和  $\Delta d2$ (也就是周跳)。因此在周跳发生前后,宽巷模糊度之差为  $\Delta d_{\delta}$ ,并且在周跳探测成功后,在周跳发生位置把数据文件重新分段,对每段周跳处的电离层残差组合  $\Delta L_J$  进行多项式拟合并外推,那么基准段  $J$  与其他段的电离层残差外推值之差具有如下关系:

$$\Delta d_{\delta} = \Delta d_1 - \Delta d_2.$$
  
(8)

$$\Delta(\Delta L_J) = \lambda_1 \Delta d_{\delta} - \lambda_J \Delta d_2.$$
  
(9)

3 改进 TurboEdit 法

3.1 对宽巷组合改进

在 TurboEdit 算法中,MW 组合是将每个历元中得到的宽巷模糊度  $d_{\delta}$  的平均值和均方根求出周跳发生的位置,这个求平均值



的过程实质是一个对宽巷模糊度  $d_0$  平滑处理、过滤杂波的过程,以此来减小噪声导致的影响<sup>[18]</sup>。在卫星运行到刚能够观测到测点时和卫星即将观测不到测点时,卫星与地面的夹角较小,观测的结果比较差。两端的数据与没有此噪声干扰的模糊度变化规律不能很好的吻合,会使所得的均方根比较大,不能很好地探测中间段的周跳现象是否发生;中间段的数据质量比较好,所得的平均值能够比较好地展现出模糊度的变化规律,对应的均方根也比较小,但把中间段的数据加到两端波形不稳定的地方来进行周跳的探测,计算结果比实际的会小很多,大概率会发生周跳的误判,造成测量结果不准。所以对 TurboEdit 法进行改进,运用滑动平均法求得平均值,滑动平均法是采用模糊度全长的所有数据,对每个数据滑动地取  $N$  个相邻的数据作为加权平均数求得最终结果,计算式如下:

$$\bar{d}_0(i) = \begin{cases} \bar{d}_0(i-1) + \frac{1}{s_k}(d_0(i) - \bar{d}_0(i-1))s_k = s_1; \\ \frac{1}{s_k} \sum_{j=i-1-s_k}^{i-1} d_0(j), & s_k = s_2, s_3. \end{cases} \quad (10)$$

(1)当卫星从刚看到观测点到与地面的夹角为  $0^\circ \sim 30^\circ$  时,因为多路径误差和对流层误差让测量的数据不准确,定义平滑移动步长等于历元数,即  $s_1 = i$ ,  $s_1$  为步长,  $i$  为本历元的数值。

(2)当卫星运行与地面的夹角大于  $30^\circ$  时,多路径效应造成的误差和对流层造成的误差处于相对平衡,平滑移动设置为  $s_2 = \min(n/10, 25)$ ,其中  $n$  为此夹角内历元数量。

(3)当卫星即将离开观测点时,卫星与地面之间的夹角逐渐小于  $30^\circ$ ,平滑移动的步长增加。平滑移动的距离设置与数据的取样频率有关,当数据的取样率为 30s 时,当前历元值  $i = 100$ ,卫星与地面的夹角为  $30^\circ$ ,平滑移动步长为  $s_3 = 100 - (\sin e)$ ,其中  $e$  为此

历元卫星与地面的夹角。

最后把式(10)带入式(8)、式(9)中,判断是否有周跳现象发生。

3.2 对电离层残差组合进行改进

对两个相邻历元之间的载波相位信号使用电离层组合进行求差,能够避免带入伪距电离层残差组合,计算如下:

$$\Delta L_{J_i} = L_{J(i)} - L_{J(i-1)} = (J + \lambda_1 d_1 - \lambda_2 d_2)_i - (J + \lambda_1 d_1 - \lambda_2 d_2)_{i-1} = \lambda_1 \Delta d_1 - \lambda_2 \Delta d_2. \quad (11)$$

式中:  $J$  为电离层延迟;  $i$  为第  $i$  个历元;  $\lambda$  为窄巷波长;  $d$  为周跳发生前模糊度。

4 模糊度变化分析

为了分析改进后的算法能否有效探测出周跳发生的位置,选取无周跳现象发生的完整长波模糊度变化情况、原始 TurboEdit 算法计算模糊度变化情况和改进后的算法模糊度变化情况作对比。无周跳现象发生的完整长波模糊度变化情况如图 1 所示。

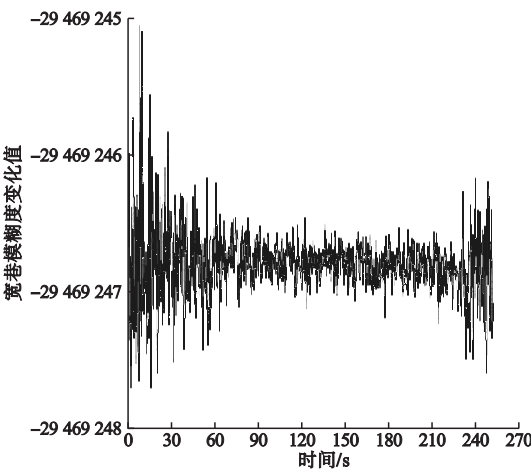


图1 无周跳现象发生的完整长波模糊度变化  
Fig. 1 Complete long-wave ambiguity change in the phenomenon without cycle slip

改进后的 TurboEdit 法和原方法的长波模糊度平均值变化如图 2 所示。从图 2 中可以看出,原方法求得的长波模糊度平均值变化规律平滑,基本是平行于坐标轴的,但改进后的长波模糊走势去掉了图 1 中的尖刺部分,又明显地展示了长波模糊度的局部变化,

与原本的长波模糊度变化规律基本一致,更

能展现出长波模糊度的变化形态。

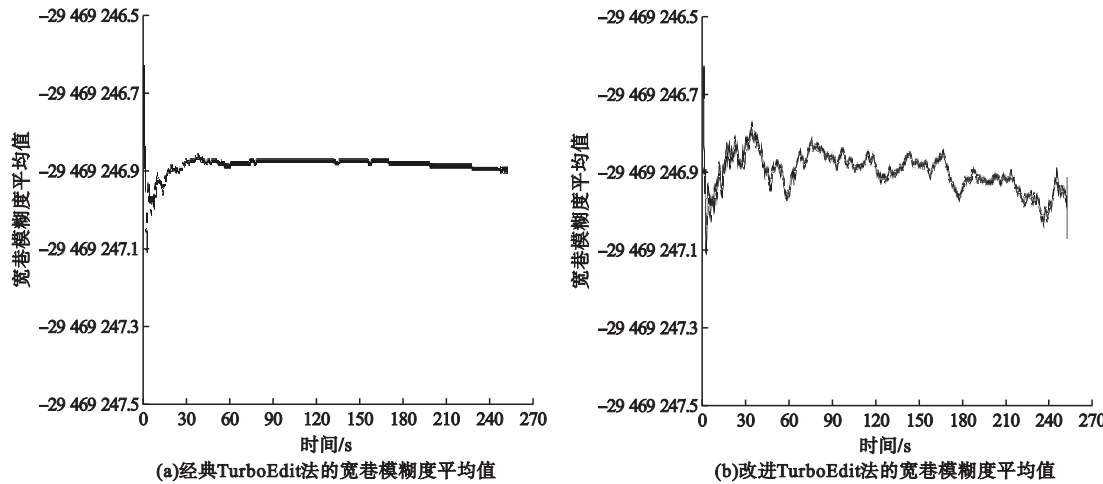


图2 改进后的 TurboEdit 法和原方法的长波模糊度平均值变化比较

Fig. 2 Comparison of the average value of long-wave ambiguity between the improved TurboEdit method and the original method

改进后的 TurboEdit 法和原方法的长波模糊度均方根的变化情况如图3所示。从图3可以看出,长波模糊度均方根基本上没有变化,但改进后的算法能够明显地展现出均

方根两端大、中间小的特点,这种规律与长波模糊度的变化规律相同。在进行周跳探测时使用改进后算法能够有效地提升周跳探测的成功率,并减小周跳误判发生的概率。

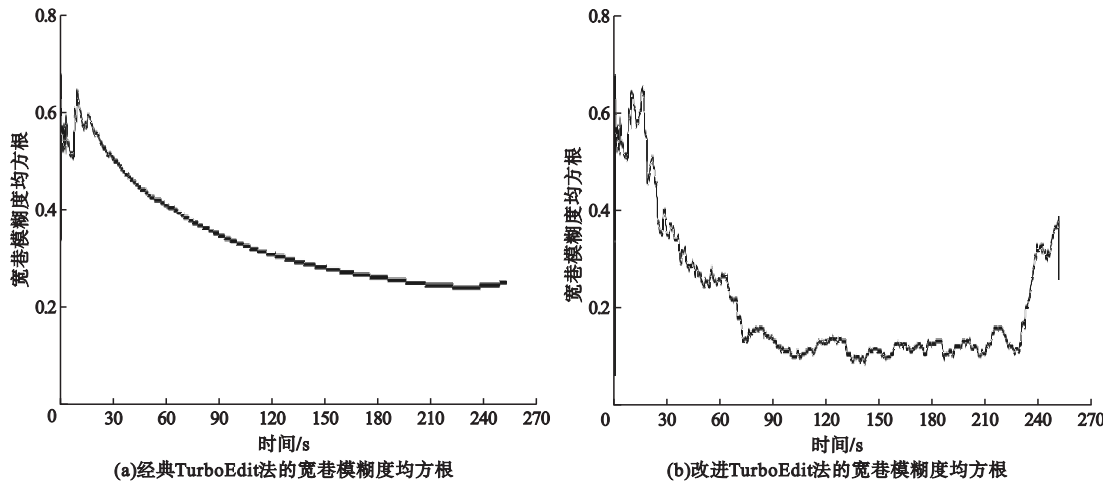


图3 改进后的 TurboEdit 法和原方法的长波模糊度均方根的变化比较

Fig. 3 Comparison of the traverse root of the long-wave ambiguity of the improved TurboEdit method and the original method

在原算法中,对载波相位和伪距电离层组合求差进而减小在信号传播过程中的电离层延迟误差。因为伪距观测本身就包括了很多不确定的随机误差,原方法对伪距组合进行了计算,但是拟合过程中的其他因素会导致得到的观测数据不准确。由于使用相邻历

元求差法可以不引入伪距电离层组合。如果电离层组合在观测值中不发生周跳现象,也就是  $\Delta d_1$  和  $\Delta d_2$  的数值为0,  $\Delta L_j$  在0的附近进行波动。在有周跳现象时,在的地方就会有明显的变化。

图4 为相邻历元的载波相位电离层组合

之差,从图中可以看出,有周跳现象发生的地方波形有显著的变化,其他的历元在 0 附近进行波动。在运用相邻历元电离层组合法时,以  $\Delta L_j$  的 3 倍均方根  $\sigma$  做为限值,当  $|\Delta L_{j_j}| \leq 3\sigma$ ,第  $i$  个历元没有周跳现象发生;当  $|\Delta L_{j_j}| > 3\sigma$ ,第  $i$  个历元发生了周跳现象。

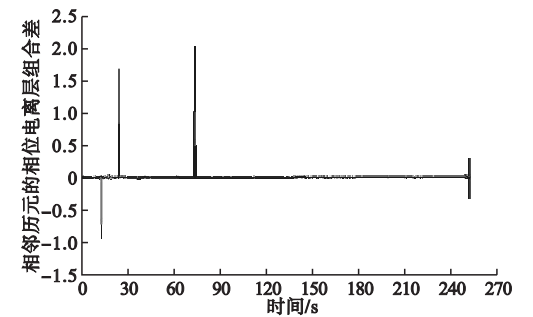


图4 相邻历元的载波相位电离层组合之差

Fig. 4 Difference between carrier phase ionosphere combinations of adjacent epochs

5 桥梁变形监测及数据分析

5.1 监测方案

利用北斗进行静态监测,随着测量时间

的增加,原本受到各种误差影响的监测结果会逐渐向监测点的真实坐标收敛。所以监测的时间越长,测量结果越准确。

本次测量测点选取在某桥两桥塔顶部和岸边一已知坐标的固定基站.把已知坐标的固定基站定义为参考点,把桥塔上的监测点定义为测试点。同时对参考点和测试点进行监测,基于参考点与测试点坐标位置的距离来对监测得到的数据进行误差分析,定义  $d_x$  为监测点与参考点之间水平距离,定义  $d_y$  为监测点与参考点之间垂直距离。利用相同的卫星对监测点进行长时间监测,以此来保证数据的准确性。

5.2 数据分析

本次试验一共观测了 10 个周期的数据,每个观测周期为 60 min,其中两个桥塔的测点分别定义为监测点 1 和监测点 2。监测点 1 监测数据结果见表 1,监测点 2 监测数据结果见表 2。

表 1 监测点 1 监测数据结果

Table 1 Monitoring point 1 monitoring data comparison table m

周期	参考点距测试点距离实测值		传统方法下距离实测值		改进方法下距离实测值	
	$d_x$	$d_y$	$d_x$	$d_y$	$d_x$	$d_y$
1	3 847 623. 972	485 623. 014	3 847 623. 972	485 623. 014	3 847 623. 972	485 623. 014
2	3 847 623. 965	485 623. 019	3 847 623. 973	485 623. 029	3 847 623. 969	485 623. 025
3	3 847 623. 969	485 623. 022	3 847 623. 981	485 623. 031	3 847 623. 976	485 623. 027
4	3 847 623. 957	485 623. 037	3 847 623. 966	485 623. 048	3 847 623. 964	485 623. 044
5	3 847 623. 983	485 623. 004	3 847 623. 998	485 623. 017	3 847 623. 991	485 623. 010
6	3 847 623. 960	485 623. 023	3 847 623. 971	485 623. 032	3 847 623. 966	485 623. 030
7	3 847 623. 977	485 623. 031	3 847 623. 987	485 623. 045	3 847 623. 982	485 623. 037
8	3 847 623. 989	485 623. 003	3 847 624. 002	485 623. 012	3 847 623. 996	485 623. 009
9	3 847 623. 975	485 623. 017	3 847 623. 983	485 623. 028	3 847 623. 981	485 623. 025
10	3 847 623. 961	485 623. 029	3 847 623. 976	485 623. 041	3 847 623. 970	485 623. 037

监测点 1 的  $d_x$  误差折线图见图 5,  $d_y$  误差折线图见图 6。由图 5 和图 6 可知,采用改进后算法的测量结果与实测值差值明显小于传统方法测量的结果与实测值差值,传统方法在 X 方向上距离差值的平均值为

1. 02 cm,在 Y 方向上距离差值的平均值为 0. 98 cm;改进后的方法在 X 方向上距离差值的平均值为 0. 59 cm,在 Y 方向上距离差值的平均值为 0. 59 cm。采用改进后的方法进行变形监测更具有优势。

表 2 监测点 2 监测数据结果

Table 2 Monitoring point 2 monitoring data comparison table

m

周期	参考点距测试点距离实测值		传统方法下距离实测值		改进方法下距离实测值	
	$d_x$	$d_y$	$d_x$	$d_y$	$d_x$	$d_y$
1	3 847 654. 132	485 718. 631	3 847 654. 145	485 718. 640	3 847 654. 142	485 718. 638
2	3 847 654. 124	485 718. 627	3 847 654. 139	485 718. 639	3 847 654. 133	485 718. 634
3	3 847 654. 119	485 718. 648	3 847 654. 130	485 718. 662	3 847 654. 127	485 718. 656
4	3 847 654. 143	485 718. 633	3 847 654. 151	485 718. 643	3 847 654. 148	485 718. 640
5	3 847 654. 137	485 718. 640	3 847 654. 149	485 718. 653	3 847 654. 145	485 718. 646
6	3 847 654. 151	485 718. 654	3 847 654. 159	485 718. 666	3 847 654. 157	485 718. 662
7	3 847 654. 144	485 718. 639	3 847 654. 154	485 718. 651	3 847 654. 151	485 718. 648
8	3 847 654. 131	485 718. 626	3 847 654. 142	485 718. 637	3 847 654. 139	485 718. 634
9	3 847 654. 145	485 718. 645	3 847 654. 159	485 718. 654	3 847 654. 154	485 718. 651
10	3 847 654. 128	485 718. 630	3 847 654. 141	485 718. 41	3 847 654. 136	485 718. 638

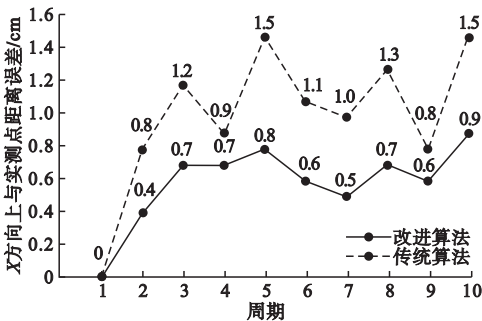


图 5 监测点 1 的  $d_x$  误差折线图

Fig. 5 Test point 1  $d_x$  coordinate error fold-line diagram

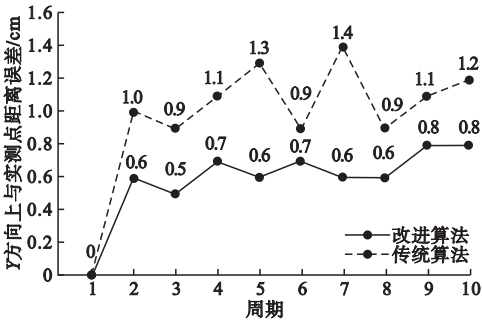


图 6 监测点 1 的  $d_y$  误差折线图

Fig. 6 Test point 1  $d_y$  coordinate error fold-line diagram

监测点 2 的  $d_x$  误差折线图见图 7,  $d_y$  误差折线图见图 8。由图 7 和图 8 可知,采用改进后算法的测量结果与实测值差值明显小于传统方法测量的结果与实测值的差值,传统算法在 X 方向上距离差值的平均值为

1. 14 cm,在 Y 方向上距离差值的平均值为 1. 13 cm;改进后的算法在 X 方向上距离差值的平均值为 0. 78 cm,在 Y 方向上距离差值的平均值为 0. 78 cm。由此可见采用改进后的算法对桥梁变形进行监测更具有优势。

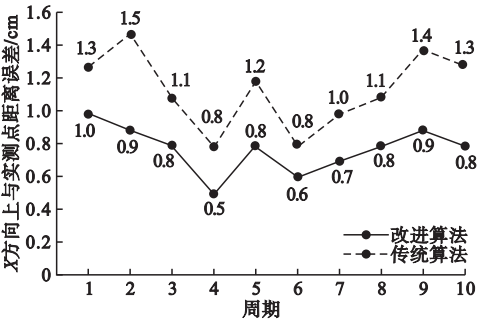


图 7 监测点 2 的  $d_x$  误差折线图

Fig. 7 Test point 2  $d_x$  coordinate error fold-line diagram

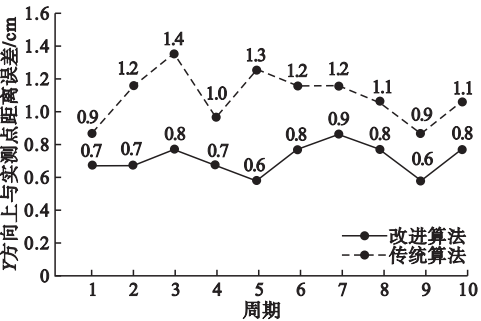


图 8 监测点 2 的  $d_y$  误差折线图

Fig. 8 Test point 2  $d_y$  coordinate error fold-line diagram



## 6 结 论

(1) 监测点 1 和监测点 2 使用传统方法测得  $X$  方向和  $Y$  方向距离差值的平均值均大于改进后算法, 由此得出改进后算法的结果比传统方法更加精确。

(2) 改进后的算法在应用的过程中能使北斗系统测量精度基本能够维持在 1 cm 以内, 基本可以满足高精度变形监测的要求。

## 参考文献

- [1] 林红梅. 一个桥梁强国的崛起[N]. 中国建设报, 2008-11-1(003).  
(LIN Hongmei. The rise of a bridge power [N]. China Construction News, 2008-11-1(003).)
- [2] DANIELE I, PASCALE F, RICCARDO B, et al. Dynamic monitoring systems for structures under extreme loads [J]. Applied mechanics and materials, 2011, 1381 (82): 15-22.
- [3] HANDAYANI H H, YUWONO M T. Preliminary study of bridge deformation monitoring using GPS and CRP (case study: suramadu bridge) [J]. Procedia environmental sciences, 2015, 24(3): 266-276.
- [4] 过静琚, 戴连君, 卢云川. 虎门大桥 GPS (RTK) 实时位移监测方法研究[J]. 测绘通报, 2000(12): 4-5.  
(GUO Jingjun, DAI Lianjun, LU Yunchuan. Study of method for real time survey on Humen bridge by GPS (RTK) [J]. Bulletin of surveying and mapping, 2000(12): 4-5.
- [5] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.  
(XIE Gang. Principle of GPS and receiver design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.)
- [6] ELLIOTT D K, CHRISTOPHER J H. GPS 原理与应用[M]. 寇艳红, 译. 第 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2007.  
(ELLIOTT D K, CHRISTOPHER J H. Understanding GPS principles and applications [M]. Translated by KOU Hongyan. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.)
- [7] 王利, 张勤, 范丽红, 等. 北斗/GPS 融合静态相对定位用于高精度地面沉降监测的试验与结果分析[J]. 工程地质学报, 2015, 23(1): 119-125.  
(WANG Li, ZHANG Qin, FAN Lihong, et al. Experiment and results of high precision land subsidence monitoring using fused BDS/GPS data and static relative positioning [J]. Journal of engineering geology, 2015, 23(1): 119-125.)
- [8] 蒋军, 王晓旺, 原彬. 一种顾及系统间偏差的 GNSS 差分定位研究[J]. 现代导航, 2018, 9(5): 313-320.  
(JIANG Jun, WANG Xiaowang, YUAN Bin. Research on inter-system bias for differential GNSS positioning [J]. Modern navigation, 2018, 9(5): 313-320.)
- [9] GAO Yang. GNSS Augmentation for precise position and navigation [R]. Shanghai: CPGPS Summer School on GNSS Frontier Technology, 2014.
- [10] 尚艳亮, 师文君, 杜守继, 等. 盾构近距离下穿桥梁数值分析与监测[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(2): 247-256.  
(SHANG Yanliang, SHI Wenjun, DU Shouji, et al. Numerical analysis and monitoring research on shield passing through bridge at close range [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(2): 247-256.)
- [11] ODIJK D. Weighting ionospheric corrections to improve fast GPS positioning over medium distances[C]. Proceeding of ION GPS 2000. Netherland: University of Technology the Netherlands Press, 2000.
- [12] 王趁香. GPS/BDS 精密单点定位算法研究与实现[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.  
(WANG Chenxiang. Research and realization on the algorithm of GPS/BDS precise point positioning [D]. Fuxin: Liaoning University of Engineering and Technology, 2017.)
- [13] 卢勇, 刘凯. 减小相位测量轮廓术中多路径效应的影响[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(12): 3680-3685.  
(LU Yong, LIU Kai. Reducing effects of multi-path in phase measuring profilometry [J]. Computer engineering and design, 2018, 39(12): 3680-3685.)
- [14] AL-SHAERY A, ZHANG S, RIZOS C. An enhanced calibration method of GLONASS inter-channel bias for GNSS RTK [J]. GPS solutions, 2013, 17(2): 165-173.
- [15] 张成才, 岳建平. 北斗/GPS 组合相对定位及精度分析[J]. 地理空间信息, 2018, 16(8): 30-33.  
(ZHANG Chengcai, YUE Jianping. Relative positioning and accuracy analysis of beidou/GPS combination [J]. Geospatial information, 2018, 16(8): 30-33.)
- [16] ZHEN Dai, KNEDLIK S, LOFFELD O. Real-time cycle-slip detection and determination for multiple frequency GNSS positioning [C]. Washington: IEEE Computer Society, 2008.
- [17] ZHANG X, ZENG Q, JUN H E, et al. Improving TurboEdit real-time cycle slip detection by the construction of threshold model [J]. Geomatics & information science of Wuhan university, 2017, 42(3): 285-292.
- [18] 李慧茹. 基于 kalman 滤波的近实时电离层 TEC 监测与反演[D]. 西安: 长安大学, 2013.  
(LI Huiru. Near real-time monitoring and inverting TEC of ionosphere based on Kalman filter [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.)  
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)