

顾及多路径误差改正的 GNSS 大坝形变监测研究

袁兵¹, 熊寻安², 龚春龙², 陈德忠¹, 闫勇伟¹

(1. 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 武汉 430079;

2. 深圳市水务规划设计院, 深圳 518036)

摘要: 在GPS短基线相对定位中, 可以根据多路径误差周期约为1天的重复性特点建立误差模型, 采用坐标域或观测值域滤波的方法进行多路径误差改正。北斗系统由GEO、IGSO和MEO三种卫星类型组成, 其中MEO卫星类型接近7天的轨道周期与GEO和IGSO约为1天的轨道周期差异较大, 因此对北斗观测值进行多路径误差改正时只能采用观测值域滤波方法。本文以某水库大坝形变监测网为例, 对GPS和BDS观测值分别建立多路径误差模型, 根据各自卫星轨道周期进行多路径误差改正, 结果表明经改正后大坝形变监测精度有较大提高。

关键词: GPS; BDS; 形变监测; 多路径误差

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2016)01-0053-07

Study on the GNSS Deformation Monitoring of Dam Considering the Multipath Error Correction

YUAN Bing¹, XIONG Xun-an², GONG Chun-long², CHEN De-zhong¹, YAN Yong-wei¹

(1. Research Center of GNSS, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Shenzhen Municipal Planning and Design Institute, Shenzhen 518036, China)

Abstract: According to that GPS multipath error cycle is about one sidereal day, correction model can be established to correct multipath error by coordinate domain filtering or observation domain filtering in GPS short baseline relative positioning. BDS is composed of three types of satellites, which are GEO, IGSO and MEO. Because MEO satellites have about seven sidereal days of orbital repeat period, which is very different from GEO and IGSO satellites' approximate one sidereal day of orbital repeat period, multipath error correction of BDS observation can be corrected only through observation domain filtering. This paper gave an example of deformation monitoring network of one reservoir dam. According to those satellites' different orbital repeat periods, multipath error correction models are established individually for GPS and BDS satellites to correct their multipath error. The results show that the precision of deformation monitoring of dam can be improved distinctively after multipath error was corrected.

Key words: GPS; BDS; Deformation monitoring; Multipath error

0 引言

大坝变形监测是对大坝安全性能监测的一个重要组成部分, 相较于传统大坝变形监测, GPS

监测具有全天候、全球性、高精度及误差不随定位时间而积累等优点^[1]。而GNSS多系统相较于单系统具有更高的稳定性、可靠性等方面的优点。中国的北斗系统(BDS)已经成为全球导航卫星系

收稿日期: 2015-02-22; 修订日期: 2015-05-16。

基金项目: 水利部公益性行业科研专项基金资助项目(201401072);

交通部信息化专项基金资助项目(2013-364-548-200)

作者简介: 袁兵(1990-), 男, 硕士, 主要从事卫星导航定位方面的研究。E-mail: yuanbing2309@yeah.net

统 (GNSS) 的重要组成部分, 集导航定位、授时、用户监测、短报文通信于一体, 技术体制上有创新, 在我国国防建设、森林防火、抗震救灾、海洋渔业、交通、水利等行业发挥重要作用^[2]。在 GNSS 定位中, 电离层、对流层、钟差、星历、多路径等误差是否得到有效消除或削弱是影响定位精度的关键。在短基线相对定位中, 电离层、对流层、钟差等站与站之间相关性较强的误差可以通过单差、双差等方式消除或削弱, 但多路径误差却无法通过组方程方式消除。目前消除多路径误差主要有三种方法: 一是选择一个较好的观测环境以及进行较长时间观测; 二是改进硬件设施; 三是通过一定数据处理算法来消除多路径影响。国内外也有较多学者对多路径进行了深入的研究: Lau 等^[3]通过射线跟踪的方法反演多路径误差, 最终达到消除的目的; 刘超等^[4]利用多路径周日强相关性特点, 根据前日数据建立的模型改正当日多路径误差; 袁林果等^[5]提出在坐标域用移动平均进行短基线静态 GPS 测量多路径误差探测的方法; 钟萍等^[6]将交叉验证法与 Vondrak 数字滤波器相组合, 提出一种分离测量资料中信号与噪声的新方法, 并将该方法用于 GPS 多路径效应的研究中; 黄声享等^[7]分析了 GPS 动态监测中多路径效应的规律性, 表明多路径具有较强周日相关性, 可以建立模型消除误差。从国内外较多研究中可知, 利用多路径误差周期重复性特点, 根据前一周期数据得到的数据模型来改正当前周期多路径误差, 可以较大幅度提高定位精度, 得到可靠性更高的定位结果。

叶世榕等^[8]根据卫星轨道重复周期, 对三种 BDS 卫星类型的载波相位观测值分别建立多路径误差模型, 并且通过实验验证了在消除多路径影响后, GPS&BDS 双系统单历元定位结果精度优于未改正的定位结果。经多路径误差改正后的单历元定位结果受观测值噪声影响较大, 因此, 文中将采用时段解模式平滑观测噪声影响, 相较于单历元定位结果, GNSS 时段解结果具有更高的可靠性和定位精度。

本文联合 GPS&BDS 双系统数据, 采用自编 GNSS 数据处理软件按照静态解算模式处理大坝 GNSS 变形监测网数据。数据处理中, 根据各卫星

信号多路径误差周期重复性特点, 利用前一周期的数据计算多路径误差模型, 并改正到 GNSS 观测值中, 以消除多路径误差影响。结果表明改正后大坝变形监测精度有较大程度提高。

1 多路径误差影响

由于测站附近反射物存在, 被反射的卫星信号与直接进入接收机天线的卫星信号产生干涉所引起的干涉时延效应称作多路径误差。多路径误差公式如下^[9]:

直射信号可表达为:

$$S_d = U \cos \omega t \quad (1)$$

U 和 ω 分别为信号电压和载波角频率。

反射信号可表达为:

$$S_r = \alpha U \cos(\omega t + \theta) \quad (2)$$

直射信号与反射信号求矢量和之后可表达为:

$$S_r = \beta U \cos(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

则

$$\begin{cases} \beta = (1 + 2\alpha \cos \theta + \alpha^2)^{\frac{1}{2}} \\ \varphi = \arctan \frac{\alpha \sin \theta}{1 + \alpha \cos \theta} \end{cases} \quad (4)$$

φ 即为载波相位测量中的多路径误差, 与入射角 θ 和反射介质 α 有关。给定一定反射介质 α , 对式 (4) 中的第二式求导并取零:

$$\frac{d\varphi}{d\theta} = \frac{\alpha \cos \theta + \alpha^2}{(1 + \alpha \cos \theta)(1 + \alpha \cos \theta + \alpha \sin \theta)} = 0 \quad (5)$$

于是得当 $\theta = \pm \arccos(-\alpha)$ 时, 多路径误差 φ 必将取得极大值:

$$\varphi_{\max} = \pm \arcsin \alpha \quad (6)$$

可见, 当 $\alpha \rightarrow 1$ 时, $\varphi_{\max} \rightarrow 90^\circ$, 即引起 1/4 周载波相位波长的距离误差。对于 GPS 系统波长分别为 19.03cm 的 L1 载波和波长为 24.42cm 的 L2, 载波最大多路径误差分别可达到 4.8cm 和 6.1cm^[7,9], 因此对大坝变形监测等精度要求很高的定位而言, 必须采取有效的方法消除多路径误差对精密定位的影响。

2 卫星信号多路径误差周日相关性分析及多路径误差建模

理论上讲, 卫星信号多路径误差周期与卫星

运动周期是一致的^[8]。叶世榕等在文献 [8] 中根据卫星高程和方位角等信息,对北斗系统 GEO、IGSO 和 MEO 的运动周期进行了详细的分析,得出 GEO 和 IGSO 卫星运动周期大概是一个恒星日, MEO 卫星大概是 7 个恒星日。

在短基线相对定位中,多路径误差无法像对流层、电离层、钟差等一样通过双差方式得以消除或削弱。假设两个测站同时跟踪相同的 m 颗卫星,则单系统线性载波相位双差观测方程可表示为:

$$v = Ax + By - l \quad (7)$$

式中, x 为测站 3×1 维坐标位置矩阵, y 为 $m \times 1$ 维双差模糊度矩阵, $m \times 3$ 维 A 矩阵和 $m \times m$ 维 B 矩阵分别为 x 和 y 的设计矩阵, l 为 $m \times 1$ 维双差观测值的余数项矩阵, v 是 $m \times 1$ 维双差观测方程残差矩阵,包括多路径误差以及噪声等。

根据最小二乘法,式 (7) 的解为:

$$\min \{ \| Ax + By - l \|_Q^2, x \in \mathbf{M}, y \in \mathbf{N} \} \quad (8)$$

式中, Q 为方差-协方差矩阵, \mathbf{M} 为实数域, \mathbf{N} 为整数域。

单差观测域滤波消除多路径误差步骤如下^[8]:

1) 以静态解模式解算上一个周期观测数据,固定模糊度后可精确算出测站坐标;

2) 将第一步算出的固定之后的模糊度以及测站精确坐标回带式 (7) 中,以此可得到双差观测方程每一个历元的双差残差值 (包括双差多路径误差项和随机误差项);

3) 假设每个历元单差观测值残差之和为零,则可以从第二步得出的双差残差中反演出单差残差;

4) 最后,在利用低通滤波去除单差残差随机噪声之后,就可以得到单差多路径误差序列,也就是多路径误差模型。

联合 GPS&BDS 双系统载波相位双差观测方程同单系统双差观测方程式 (7) 是一致的,后续的处理过程也相同。但是,北斗系统和 GPS 系统之间有些许差别,在联合处理双系统数据的时候需要对两个系统做融合:它们信号频率不一致,做

双差时需要各自选择参考星;时间基准不一致,两个系统有 14s 的差别;它们各自的坐标系统有几个厘米的差别,但在短基线相对定位中可以忽略不计等。

3 GNSS 监测网数据处理及分析

3.1 数据采集

大坝 GNSS 监测网数据采集在水库主坝进行,开始时间是 2014 年 7 月 17 日,结束时间为 2014 年 8 月 2 日。

水库坝面监测墩 12 个,均位于主坝背水面,试验时采用这些监测墩安置 GNSS 仪器,现场测站如图 1 所示。监测点位于两个纵断面上,纵断面编号为 CL、DL,监测点编号分别为 CL01 ~ CL06, DL01 ~ DL06。

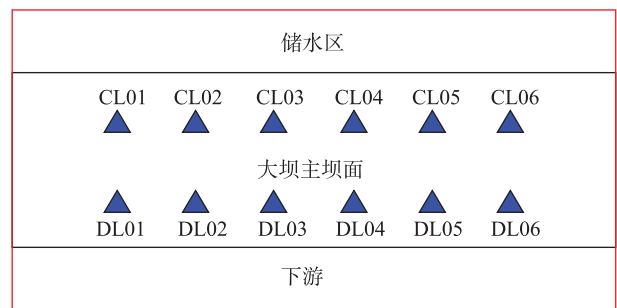


图 1 测区大坝面监测点分布示意图

Fig. 1 Distribution map of monitoring point of dam

由于条件有限,不能同时在所有的观测墩上安放接收机,所以数据采集分 4 个时段开展,每个时段连续观测时间均大于 72h。各时段观测时间如表 1 所示,各时段参与大坝 GNSS 监测网组网测站分布如表 2 所示,“√”代表这个测站参与到该时段监测网组网。

表 1 4 个观测时段概略时间表

Tab. 1 General schedule of four observation periods

时段号	开始时间	结束时间
时段 1	2014. 7. 17 12 : 00	2014. 7. 21 09 : 00
时段 2	2014. 7. 21 10 : 00	2014. 7. 25 09 : 00
时段 3	2014. 7. 25 10 : 00	2014. 7. 29 17 : 00
时段 4	2014. 7. 29 16 : 00	2014. 8. 02 15 : 00

表 2 各时段参与大坝 GNSS 监测网组网测站分布

Tab. 2 Station distribution of dam GNSS motoring network of four periods

	CL01	CL02	CL03	CL04	CL05	CL06	DL01	DL02	DL03	DL04	DL05	DL06
时段 1	√	√	√	√	√	√						
时段 2	√		√		√		√		√		√	
时段 3	√						√	√	√	√	√	√
时段 4	√	√		√		√		√		√		√

3.2 大坝 GNSS 监测网数据处理及分析

将数据分割为以每 2h 为一个时段样本，由自编 GNSS 数据处理软件按照静态解算模式处理。其中，设置截止高度角为 10°，模糊度最短时间长度为 400s。每一个时段的每一条基线数据分为 2h 样本数据，然后按照静态基线解算方式结算最终结果。取该时段内一天观测值解算的三个位置参数作为参考值，将各时段数据解算结果转换为 North、East 和 Up 三个方向，分别画出每条基线每个时段三个方向定位结果的时间序列。其中，每个图上数字代表该基线该时段内三个方向定位结果的标准差，计算公式如下：

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \tag{9}$$

其中， X_i 为第 i 个样本值， \bar{X} 则为所有样本的均值，标准差可以反应数据的离散程度，值越大，则数据集越离散。

由于基线数较多，本文只列出第一个时段各基线在未改正多路径误差前和改正多路径误差后的方向定位结果时间序列图，然后列出所有时段所有基线的精度统计表。

3.2.1 未改正多路径误差

在未改正多路径误差前，观测时段 1 各基线方向定位结果时间序列如图 2、图 3 所示。

该时段接收机全部安置在大坝上部的横断面观测墩，随着基线距离增加，解算结果逐渐变差，如 C03-C06 基线，长度为 178m，U 方向 RMS 值为 5mm。

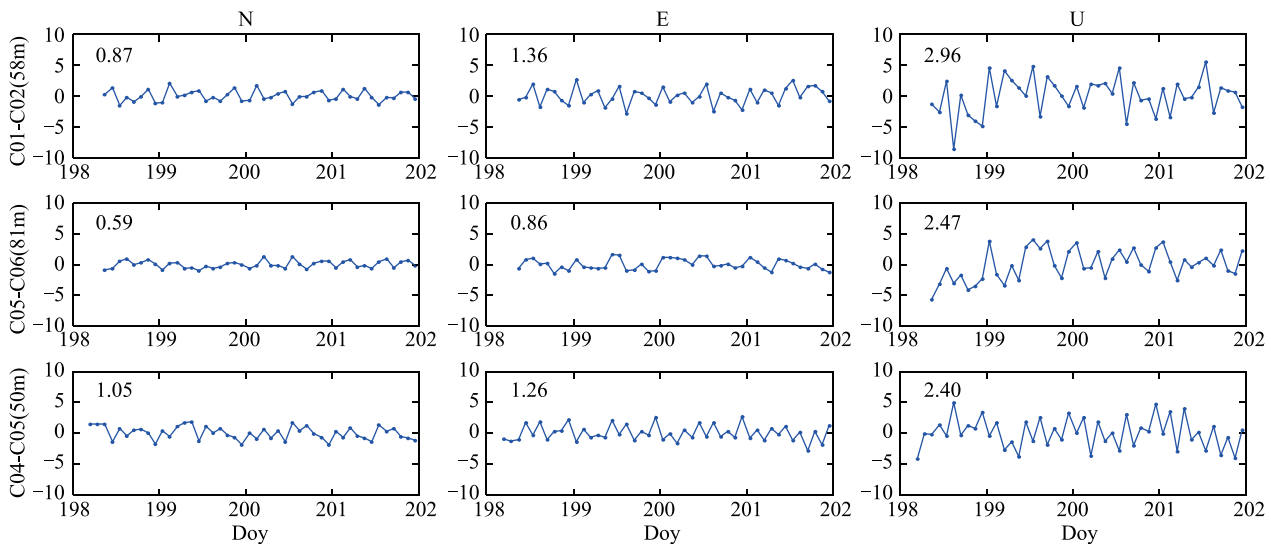


图 2 多路径误差改正前观测时段 1 的 C01-C02、C05-C06、C04-C05 基线结果图

Fig. 2 Result map of C01-C02、C05-C06、C04-C05 baselines of the first observation period before multipath correction

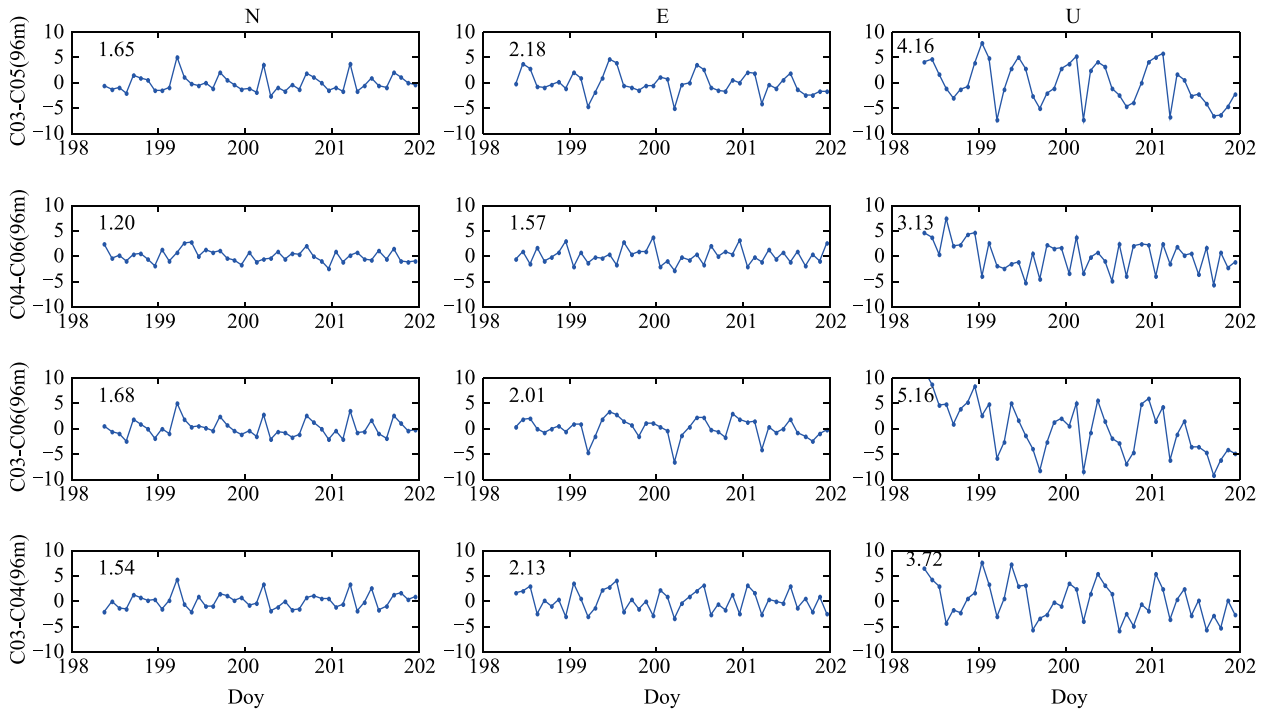


图 3 改正多路径误差前观测时段 1 的 C03-C04、C03-C06、C04-C06、C03-C05 基线结果图

Fig. 3 Result map of C03-C04、C03-C06、C04-C06、C03-C05 baselines of the first observation period before multipath correction

3.2.2 改正多路径误差之后

根据自编 GNSS 数据处理软件及多路径误差模型，改正时段 1 各基线多路径误差，其方向定位结果时间序列图如图 4、图 5 所示。

从图 2~图 5 分析可以看出，时段 1 各基线得到多路径误差改正后，精度有明显提高。将时段 1、时段 2、时段 3 和时段 4 所有基线多路径误差改正前后的定位结果统计如表 3 所示。

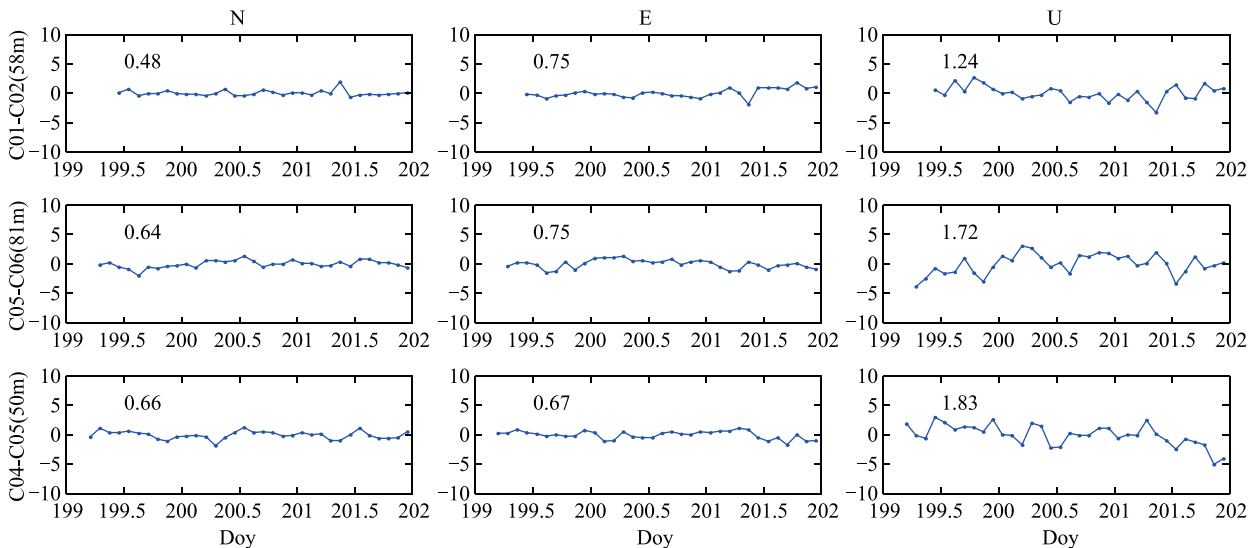


图 4 多路径误差改正后观测时段 1 的 C01-C02、C05-C06、C04-C05 基线结果图

Fig. 4 Result map of C01-C02、C05-C06、C04-C05 baselines of the first observation period after multipath correction

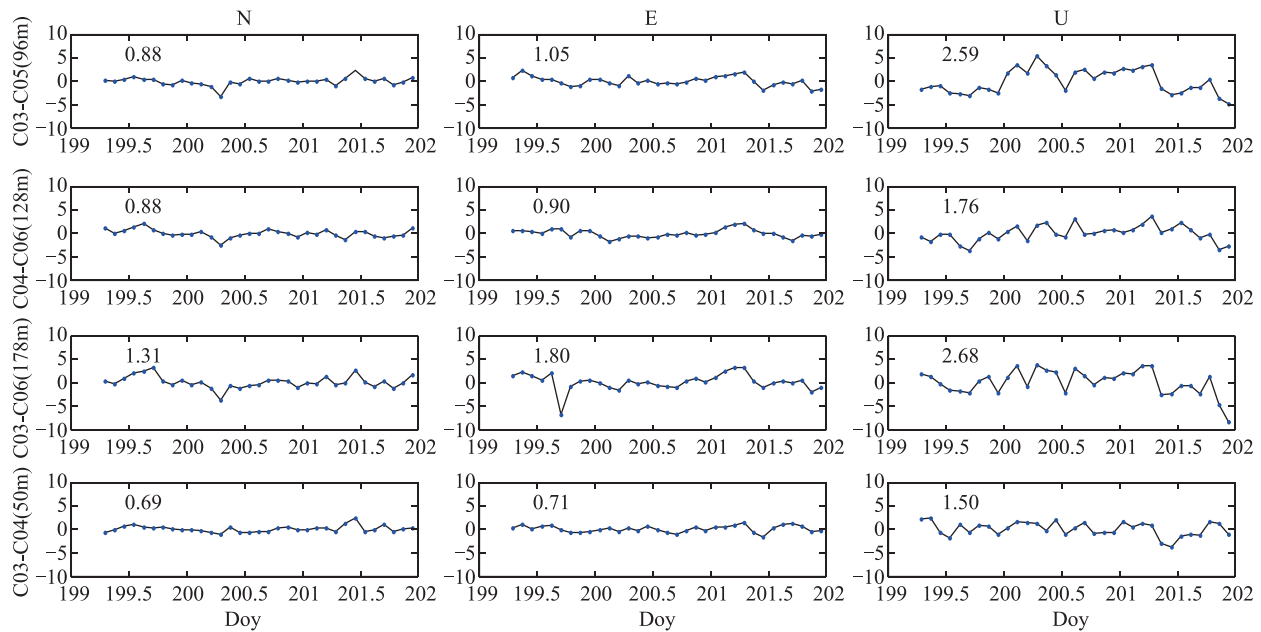


图 5 改正多路径误差后观测时段 1 的 C03-C04、C03-C06、C04-C06、C03-C05 基线结果图

Fig.5 Result map of C03-C04、C03-C06、C04-C06、C03-C05 baselines of the first observation period after multipath correction

表 3 四个时段基线解统计 (长度/m; N、E、U 方向/mm 下改正前后 std 统计)

Tab.3 Baseline statistics of four observation periods (lenth/m; std statistics of N, E and U directions/mm before and after multipath correction)

序号	时段	基线	长度	North		East		Up	
				改正前	改正后	改正前	改正后	改正前	改正后
1	1	C01-C02	58	0.87	0.48	1.36	0.75	2.96	1.24
2	1	C05-C06	81	0.59	0.64	0.86	0.75	2.47	1.72
3	1	C04-C05	50	1.05	0.66	1.26	0.67	2.40	1.83
4	1	C03-C05	96	1.65	0.88	2.18	1.05	4.16	2.59
5	1	C04-C06	128	1.20	0.88	1.57	0.90	3.13	1.76
6	1	C03-C06	178	1.68	1.31	2.01	1.80	5.16	2.68
7	1	C03-C04	50	1.54	0.69	2.13	0.71	3.72	1.50
8	2	C05-D05	21	0.85	0.29	0.58	0.22	1.70	0.57
9	2	C05-D03	99	0.84	0.42	0.77	0.36	1.95	0.80
10	2	C03-C05	96	1.33	0.81	1.32	0.68	2.95	2.02
11	2	D03-D05	97	0.46	0.37	0.64	0.48	1.66	0.71
12	2	C03-D05	99	1.88	0.89	1.17	0.96	4.58	1.77
13	2	C03-D03	121	1.66	0.92	1.40	0.79	3.09	1.81
14	3	D03-D04	50	0.43	0.43	0.78	0.38	1.81	1.37
15	3	D02-D04	129	0.74	0.77	0.66	0.49	1.56	1.42
16	3	D02-D03	79	0.64	0.54	0.82	0.45	2.05	1.79
17	3	C01-D01	21	0.49	0.28	0.63	0.45	2.70	1.34
18	3	D05-D06	81	0.47	0.46	0.48	0.43	1.80	1.76
19	3	C01-D05	315	1.34	1.68	0.93	1.32	2.43	3.10
20	3	D01-D06	235	1.16	1.38	1.09	1.03	1.92	2.22
21	4	C01-C02	58	1.10	0.44	1.08	0.32	2.44	0.50
22	4	C06-D06	21	0.86	0.20	1.25	0.33	3.07	0.86
23	4	C02-D06	315	1.54	2.22	1.41	0.86	4.11	1.71
24	4	C02-C06	315	1.29	2.12	0.95	1.02	3.17	1.70
25	4	C04-D04	21	0.75	0.24	1.14	0.17	2.28	0.64

再分别将不同长度的基线多路径误差改正前后 N、E、U 三个方向 RMS 定位均值统计如表 4 所示。

表 4 不同长度范围内所有基线多路径误差改正前后的 RMS 定位均值

Tab. 4 RMS positioning means of all baselines of different lengths before and after multipath correction

基线长度/ m	N		E		U		样本 数
	改正前	改正后	改正前	改正后	改正前	改正后	
<40	0.70	0.20	0.86	0.23	2.38	0.68	4
<60	0.85	0.37	1.09	0.40	2.52	0.98	9
<100	0.90	0.48	1.06	0.51	2.60	1.27	17
100~200	1.32	0.97	1.41	0.99	3.23	1.91	4
200~300	1.33	1.85	1.09	1.05	2.90	2.18	4

3.2.3 监测网结果分析

分析表 3 可知, 25 条基线经过多路径误差改正, 其中 21 条基线解算结果均优于未做多路径误差改正后的结果。经多路径误差改正后观测时段 1 和 2 的基线解算结果在三个方向上均优于未做多路径误差改正的基线结果; 观测时段 3 中 C01-D05 (315m)、D01-D06 (235m) 和观测时段 4 中 C02-D06 (315m)、C02-C06 (315m) 则差于未做多路径误差改正的结果。一方面是由于基线较长, 且观测数据较差; 另一方面是由于数据采集均为 5s 数据。

再分析表 4 可知, 在 200~300m 范围内的基线 N 方向多路径误差改正后结果较未改正前差, 主要是由于有 3 条 315m 和 1 条 235m 基线改正效果较差。对于小于 200m 的 21 条基线在未做多路径误差改正时 N、E、U 三个方向定位精度达到 1.5mm、1.5mm 和 3.5mm 以内, 而改正多路径误差后达到 1.0mm、1.0mm 和 2mm 以内, 分别提高了约 33%、33% 和 43%; 对于 100m 以内的 17 条基线在改正多路径误差之后 N、E、U 三个方向定位精度分别提高了 47%、52% 和 51%。

4 结论

在 GNSS 监测网数据处理过程中, 根据北斗和

GPS 卫星轨道不同的轨道重复周期, 对它们不同卫星类型的载波相位观测值分别建立多路径误差模型, 由自编 GNSS 数据处理软件按照静态解模式处理, 结果表明大坝形变监测网在经过多路径误差改正后精度有较大提高, 对于 200m 以内的 21 条短基线在改正多路径误差后, N、E、U 三个方向精度分别提高了约 33%、33% 和 43%, 这对定位精度要求很高的大坝形变监测而言是非常有利的, 同时说明我国北斗导航定位系统已完全可以在水利、国防等方面发挥重要作用。文中实验结果显示 4 条 300m 左右长度的基线在根据文中模型消除多路径误差后定位结果反而变差, 说明该方法对于较长基线多路径误差改正存在一定偏差性, 在以后的工作中有待改进。

参考文献

- [1] 刘玉庆, 李艳杰, 徐成业. GPS 大坝变形监测系统[J]. 中国新技术新产品, 2011, 9: 1.
- [2] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报, 2010, 39 (1): 1-6.
- [3] Lawrence Lau, Paul Cross. Development and testing of a new ray-tracing approach to GNSS carrier-phase multipath modelling. J GEOD, 2007, 81: 713-732.
- [4] 刘超, 王坚, 胡洪, 高井祥. 动态变形监测多路径实时修正模型研究[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2010, 35 (4): 481-485.
- [5] 袁林果, 黄丁发, 丁晓利, 等. GPS 载波相位测量中的信号多路径效应影响研究[J]. 测绘学报, 2004, 33 (3): 210-215.
- [6] 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.
- [7] 黄声享, 李沛鸿, 杨保岑, 向东. 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), 2010, 30 (10): 877-870.
- [8] Shirong Ye, Dezhong Chen, Yanyan Liu, et al. Carrier phase multipath for BeiDou navigation satellite system. GPS Solution, 2014, DOI.
- [9] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010: 116-119.