

GPS 载波相位测量中的信号多路径效应影响研究

袁林果¹, 黄 发¹, 晓利², 熊永良¹, 钟 萍¹, 李成钢¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 香港理工大学, 香港 九龙)

On the Influence of Signal Multipath Effects in GPS Carrier Phase Surveying

YUAN Lin-guo¹, HUANG Ding-fa¹, DING Xiao-li², XIONG Yong-liang¹, ZHONG Ping¹, LI Cheng-gang¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: Recently GPS technique has not only been used for land surveying but also for monitoring applications that requires more accurate and reliable baseline solutions at millimeter level. In these high precision GPS applications, such as structure deformation monitoring, multipath effects could not be ignored or eliminated by averaging. The influence of multipath effects in GPS carrier phase surveying is theoretically analyzed, the characteristics of signal multipath effects and the effective magnitude of the measurements of carrier phase are studied. A moving average method of detecting multipath effects in coordinate sequence for a short static baseline is presented based on the previous analysis, and some useful results from the experience are summarized.

Key words: GPS; multipath effects; carrier phase surveying; moving average

摘 要: 当利用 GPS 进行高精度变形监测时, GPS 信号的多路径效应成为影响 GPS 变形监测精度和可靠性的一种不可忽略的误差源。本文针对 GPS 载波相位测量中的多路径效应影响进行理论和试验分析。论述载波相位测量中 GPS 多路径信号的特征, 分析它对载波相位测量的影响, 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。通过实测数据进行分析, 取得满意的效果。

关键词: GPS; 多路径效应; 载波相位测量; 移动平均

1 引 言

由于 GPS 测量具有高精度的 3 维定位能力, 所以它逐渐成为各种高精度测量(如: 各类地形、地貌或工程结构变形监测等)的一种极为有效的应用手段。当应用 GPS 技术进行高精度测量时,

由于对测量精度的要求很高(毫米级), 因此, 在通常的 GPS 测量中所忽略的一些误差影响源, 在上述高精度测量中则必须予以高度重视。GPS 观测测量受到很多因数的影响, 如: 信号的大气传播延迟(电离层和对流层), 卫星和接收机相关的误差等^[1]。对于 GPS 的这些误差影响源而言, 已有了

收稿日期: 2003-07-16; 修回日期: 2003-11-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40271091)

作者简介: 袁林果(1980-), 男, 四川南充人, 博士研究生, 主要从事 GPS 高精度测量的理论与应用的研究。

较深入的认识,并掌握了一些在一定条件下行之有效的消除办法,如:差分 GPS 技术等。差分组合的特点是消除公共误差项的相关影响部分,其误差消除效果会随着基线的增长而减弱,但差分技术对多路径效应的影响无能为力。考虑到局部变形监测中,基线布设的长度均较短,可以认为各项误差的影响具有强相关性,通过差分技术有效地消除了各项相关误差影响,因此多路径效应就成为其主要的影晌源。

GPS 卫星信号从 20 000 km 高空向地面发射,接收机天线接收的信号不但有直接从卫星发射的信号,还有从反射体反射的间接信号,这两种信号叠加被接收机接收后产生干涉从而影响码和相位的量测,这种效应称为多路径效应(如图 1 所示),由此产生的定位误差称为多路径误差。反射信号可分为远距离反射和近距离反射,其中远距离反射可通过在接收机中采用 MEDLL、窄相关等技术来改善或削减^[2,3],所以近距离反射是多路径效应的关键所在。本文侧重探讨载波相位测量中多路径效应,在坐标域分析其多路径效应的特性,它们对研究 GPS 多路径效应影响和实施高精度 GPS 卫星测量或变形监测具有重要的意义。

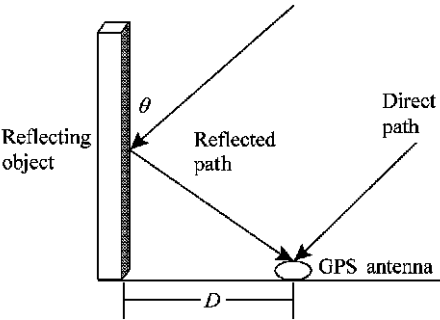


图 1 GPS 多路径现象示意图
Fig. 1 Multipath phenomenon of GPS signal

2 载波相位测量中 GPS 多路径信号特征

因存在多路径影响,接收机所接收的信号分两类,即直接到达的信号和间接到达(物体反射和大气折射)的信号。这些信号一起被接收机所接收,相互干涉而产生一个复合信号,影响码和相位的量测,从而降低 GPS 的定位精度。直达信号和多路径信号的合成信号,可表示为^[4]

$$s(t) = d(t)c(t)A \sum_{i=1}^n \alpha_i \cos(\omega_0 t + \Delta_i) \quad (1)$$

其中, $d(t)$ 是导航电文; $c(t)$ 为伪随机码(C/A 码或 P 码); A 是载波信号振幅; α_i 为反射物体反射信号的能力即反射系数($0 \leq \alpha_i \leq 1$, 对于直达信号 $\alpha_0 = 1$); ω_0 为 GPS 信号载波角频率; Δ_i 为第 i 个信号的相位延迟。

由于载波相位测量中的多路径效应影响主要是由信号相位延迟所引起的误差,而与 $d(t)$, $c(t)$ 及 A 无关[从下面式(6)和式(10)也可以看出]。所以为了讨论方便,这里忽略码和导航电文的影响。当只有一个多路径信号存在时,直达信号 S_{LOS} 可以用数学形式表示为

$$S_{LOS} = A \sin(\omega_0 t) \quad (2)$$

多路径信号可表示为

$$S_{M1}(t) = \alpha_1 A \sin(\omega_0 t + \Delta_1) \quad (3)$$

那么,总的叠加信号可以表示为

$$S_{total}(t) = A \sin(\omega_0 t) + \alpha_1 A \sin(\omega_0 t + \Delta_1) \quad (4)$$

总的叠加信号可以用如下数学形式来表述

$$S_{total}(t) = \alpha_c A \sin(\omega_0 t + \Delta_c) \quad (5)$$

这里, α_c 和 Δ_c 分别为复合反射系数和总的相对相位偏移。那么,我们可以求得

$$\Delta_c = \arctan\left(\frac{\alpha_1 \sin \Delta_1}{1 + \alpha_1 \cos \Delta_1}\right) \quad (6)$$

$$\alpha_c = \sqrt{1 + 2\alpha_1 \cos \Delta_1 + \alpha_1^2} \quad (7)$$

Δ_c 即为相位多路径效应误差。

当同时有多个多路径信号存在时,直达信号可用(2)来表示,多路径信号可以表示为

$$S_M(t) = \sum_{i=1}^M \alpha_i A \sin(\omega_0 t + \Delta_i) \quad (8)$$

总的叠加信号为

$$S_{total}(t) = A \sin(\omega_0 t) + \sum_{i=1}^M \alpha_i A \sin(\omega_0 t + \Delta_i) \quad (9)$$

和前面类似,总的叠加信号可以表示为 $S_{total}(t) = \alpha_c A \sin(\omega_0 t + \Delta_c)$, 那么

$$\Delta_c = \arctan\left(\frac{\sum_{i=1}^M \alpha_i \sin \Delta_i}{1 + \sum_{i=1}^M \alpha_i \cos \Delta_i}\right) \quad (10)$$

$\alpha_c =$

$$\sqrt{1 + 2 \sum_{i=1}^M \alpha_i \cos \Delta_i + \left(\sum_{i=1}^M \alpha_i \cos \Delta_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^M \alpha_i \sin \Delta_i\right)^2} \quad (11)$$

其相位延迟变化率为

$$f_M = \frac{d\Delta_c}{dt}$$

(12)

式(6)和式(10)即为载波相位多路径效应影响的数学表达式。利用式(6)绘出多路径相位误差曲线图,如图2(a)所示。可见,载波相位多路径误差的大小取决于反射系数 α 和 Δ_1 。当 $\alpha_1 \rightarrow 1$, $\Delta_1 \rightarrow \pi$ 时, $\Delta_c \rightarrow \pi/2$,此时可以引起1/4周的最大误差。因此, L_1 信号的波长为19.05 cm,其最大误差为4.8 cm; L_2 信号的波长为24.42 cm,其最大误差为6.1 cm。对于 L_1 和 L_2 的线性组合而言,宽巷最大误差为21.5 cm,窄巷的最大误差为2.7 cm。从而可知, L_1 和 L_2 的窄巷组合可以削减多路径的影响。利用公式(10)可得到类似的结果。

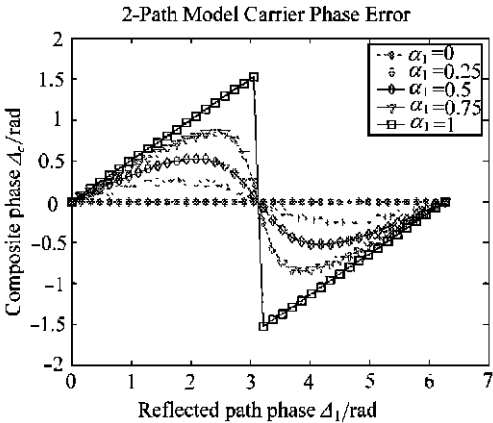


图 2(a) 存在一个反射信号的相位误差
Fig. 2(a) Carrier phase error for 2-path model

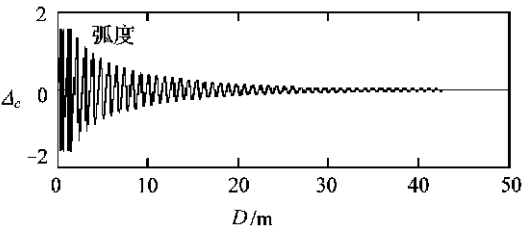


图 2(b) 相位多路径效应与反射体距离的关系
Fig. 2(b) Relationship between phase multi-path effects and reflecting distance

从上述分析我们知道:多路径效应影响主要由近距离反射引起。那么,多路径效应影响与反射物体到 GPS 天线的距离究竟有何关系呢?由图1知多路径信号的相位漂移与反射物体的距离、以及信号入射角的关系为

$$\Delta_1 = \frac{2D}{\lambda} \sin \theta$$

(13)

由于电磁波在大气中传播会衰减,衰减公式

为^[5]

$$I = I_0 e^{-S\beta}$$

(14)

式中, I_0 为射入能量; I 为反射到天线的能量; S 为光程; β 为衰减系数。当反射物距离天线10 m时(β 取0.23),卫星信号衰减1/10,距离20 m时衰减40 dB,距离50 m时信号功率衰减100 dB。一般来说,延迟距离50 m以外的信号已衰减100 dB,就可以不必考虑了。

顾及式(6)、(13)、(14),同时考虑到信号入射角的实际情况,取 $\theta = \pi/4$, D 由0变化到50 m, α 即由1减为0,如图2(b)。

3 实测数据分析

为了进一步分析载波相位多路径的特性以及对 GPS 坐标序列的影响,利用实测数据进行分析。数据采集在 GPS 检定场进行,共选择了两个基准点。在同一时间段内采集了连续3天的数据。两点间的基线长为346 m,均采用强制对中观测。其中一点设为参考点,另一点为监测点,旁边设有一反射体,以产生信号多路径效应。

GPS 数据处理采用动态轨迹解算,逐历元解算出监测点的动态轨迹,在坐标域分析其相位多路径的影响。试验数据是由 ASHTech 公司 Z-Xtreme 双频接收机进行采集的,数据采样间隔为10 s。由于参考点和基准点距离非常短,其公共误差如星历误差、卫星钟差、电离层和对流层折射误差以及与接收机有关的误差,都可以通过双差得以消除。因此,对监测点来说,其主要点位误差来源于多路径效应、卫星可视条件以及随机噪声。

由于多路径效应与卫星一测站的几何构形以及环境条件密切相关,因此对于特定环境(或反射条件),多路径效应与 GPS 卫星轨道的运行周期相关。已知 GPS 卫星运行周期约为11小时58分,因此从理论上讲,同一观测站上,相邻的两天可见卫星分布图形应基本相同,所以两天同一时刻 GPS 信号的入射角变化不大。即在同一地点,同一卫星分布的情况下,多路径的影响具有强相关的特性。图3和图4分别是连续3天相同时段内监测点的南北向和东西向坐标序列图。比较3天的结果证实了上述分析。这说明多路径效应存在的客观性以及多路径效应应具有可重复性特征,而且能清楚地发现,对于差分定位,多路径效应对坐标序列的影响其波动达厘米级,成为坐标序列的主要误差影响源。

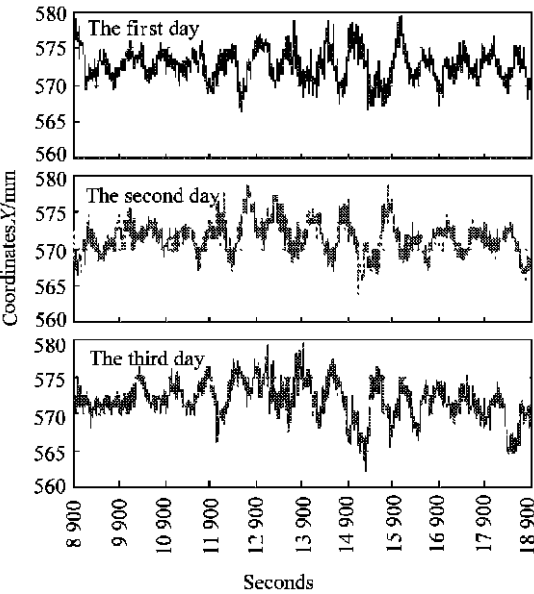


图 3 南北向坐标序列
Fig. 3 Coordinates sequence (North-South)

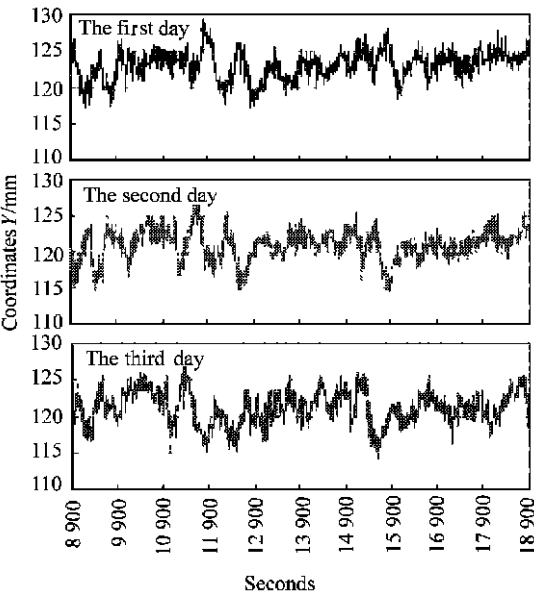


图 4 东西向坐标序列
Fig. 4 Coordinates sequence (East-West)

如上分析,图 3 和图 4 中的坐标序列主要包含了多路径误差和随机噪声的影响。由于卫星几何分布是随时间连续变化的,因此多路径误差在各个相邻历元间具有强相关性;另一方面,随机噪声在各个相邻历元间相互独立,并且服从正态分布。由式(12)可知,多路径效应也具有周期性,这一点也可从图 3 和图 4 中的坐标序列中看出来。因此,可以采用移动平均方法来平滑其坐标序列,剔除其随机噪声,得到其多路径效应的影响,如图

5 和图 6 所示。具体计算公式如下

$$MP_i = \frac{x_{i-\lfloor n/2 \rfloor} + x_{i-\lfloor n/2 \rfloor+1} + \dots + x_i + \dots + x_{i+\lfloor n/2 \rfloor}}{n} - \bar{x} \tag{15}$$

其中, x_i 为第 i 历元的坐标值, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整, n 为移动平均周期,取为奇数, \bar{x} 为 x_i 总的平均值。值得注意的是,其移动平均周期应与多路径效应的影响周期(即相位延迟变化率,式(12))一致,这样平滑效果好一些。本例中其周期取为 9 个历元,约为 $1'30''$ 。

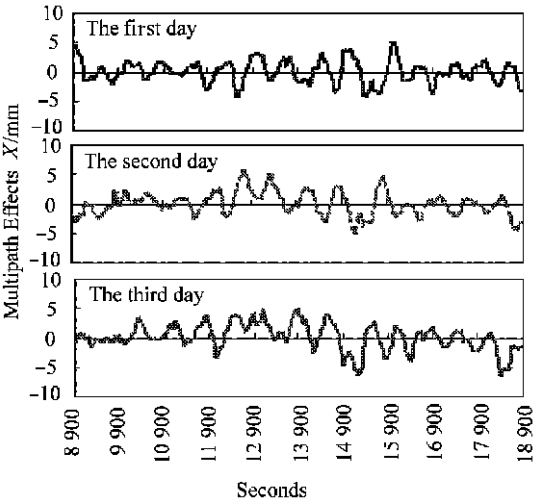


图 5 多路径效应(南北向)
Fig. 5 Multipath effects (North-South)

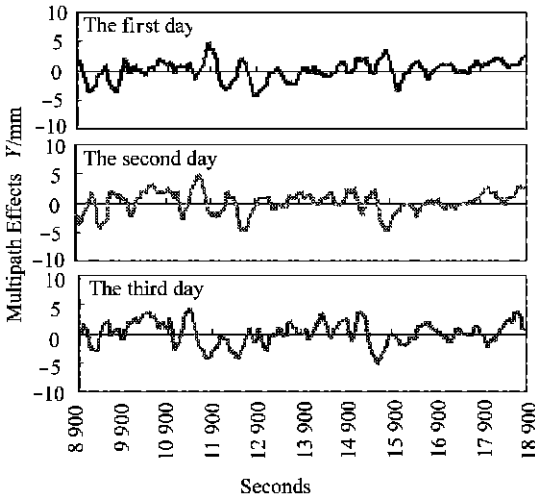


图 6 多路径效应(东西向)
Fig. 6 Multipath effects (East-West)

为了从理论上探讨多路径效应的相关性,我们计算了上述连续 3 天多路径效应误差的相关性。采用如下公式来计算

$$\rho_{XY} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{D(X)} \sqrt{D(Y)}} \tag{16}$$

其中, (X, Y) 为随机变量, $\text{Cov}(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_1^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)$ 即变量 X 和 Y 的协方差, $D(X)$ 和 $D(Y)$ 分别为变量 X 和 Y 的方差。这里, 设 $X = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, $Y = \{t_{1+i}, t_{2+i}, \dots, t_{n+i}\}$, i 为相关延迟历元数, t_i 为第 i 个历元的多路径效应误差。分析结果如图 7, 图 8 和表 1 所示。

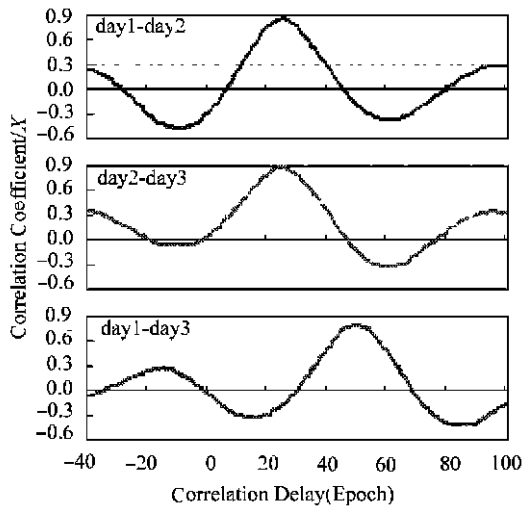


图 7 多路径效应相关曲线(南北向)
Fig. 7 The correlation curve of multipath (North-South)

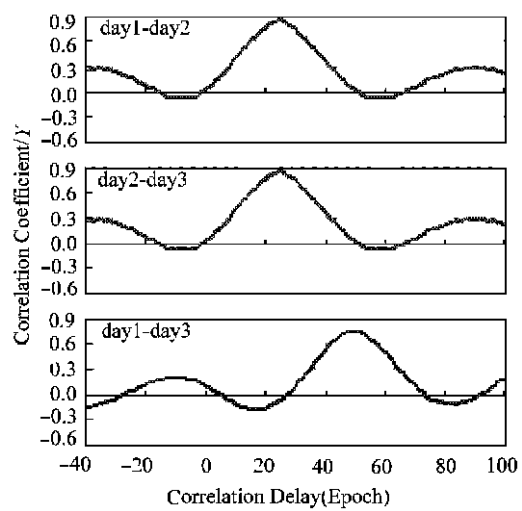


图 8 多路径效应相关曲线(东西向)
Fig. 8 The correlation curve of multipath (East-West)

表 1 多路径效应相关延迟统计
Tab. 1 Statistic of the multipath correlation delay

| 相关日期 | 相关多径误差序列 | 最大相关值 | 相关延迟 / s |
|------------|----------|-------|----------|
| Day1~ day2 | 南北向 | 0.848 | 240 |
| | 东西向 | 0.844 | 240 |
| Day2~ day3 | 南北向 | 0.863 | 240 |
| | 东西向 | 0.846 | 230 |
| Day1~ day3 | 南北向 | 0.793 | 480 |
| | 东西向 | 0.758 | 470 |

从分析结果可以看出, 相邻两天在相关延迟为 230 s 和 240 s 时出现最大相关值, 考虑到观测历元间隔为 10 s, 这和相关延迟的理论值 236 s 左右是相符的。并且, 随着间隔天数的增加, 最大相关系数值会逐渐减小, 如第 1 天和第 3 天的相关值比前相邻两天都要低。说明同一地点, 随着天数增加, 卫星几何条件在发生变化。

通过以上的分析可以看出: 图 3 和图 4 坐标序列的变化源于信号多路径效应的影响, 不仅相似, 而且具有定量分析上的严格数字一致性。所以按多路径效应剔除其影响, 可以进一步提高精度。图 9 和图 10 分别为南北向和东西向剔除多路径效应以后的坐标序列。和图 3、图 4 坐标序列作比较可以看出, 其坐标序列的稳定性大大提高。

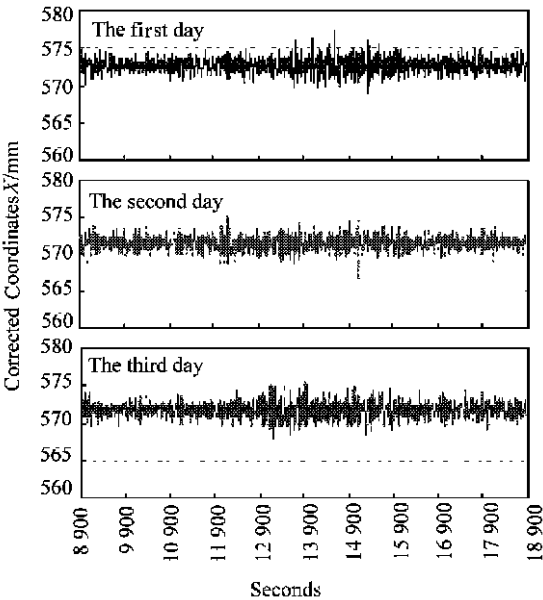


图 9 剔除多路径误差后的坐标序列(南北向)
Fig. 9 Coordinates sequence after multi-path effects eliminated (North-South)

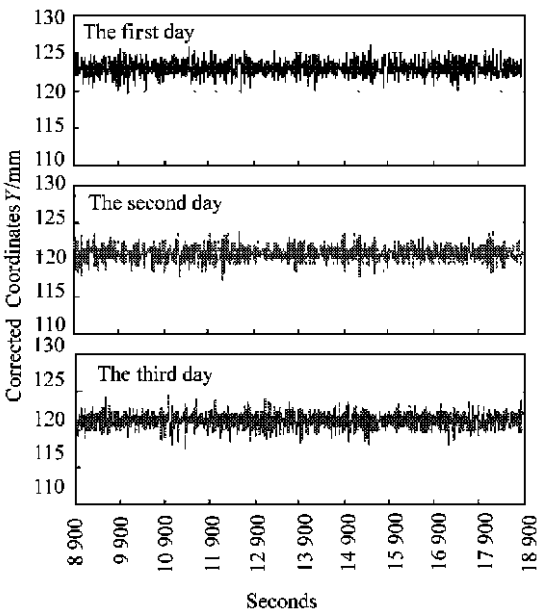


图 10 剔除多路径误差后的坐标序列(东西向)

Fig. 10 Coordinates sequence after multi-path effects eliminated (East-West)

为了削减多路径效应的影响,出现了各种抵抗多路径效应影响的技术。由于多路径效应在参考站和接收机之间不存在相关性,因此无法通过差分方法消除。目前,削减多径影响的方法包括正确的选址、抗多路径天线的设计、接收机结构设计^[8]和观测数据后处理等;对于静态高精度测量来说,选择合适的天线安置环境往往也是削弱多径影响的有效措施,有效而必要的数据处理和分析方法也是必不可少的。

4 结 论

通过以上的分析和讨论,我们可以得到如下结论:

1. 多路径效应影响由间接信号的相对幅度、相位、相位速率和延迟所决定。多路径误差的量级在载波相位测量中可达厘米级,在高反射环境下更大。因此,在高精度 GPS 测量中,必须顾及多路径误差的影响。
2. 多路径效应对平面坐标的影响可达数厘米不等,且随卫星轨道呈周期性变化,具有可重复性特征。在大多数情况下,多路径误差不能按上面引用的最坏情况值断定,因为反射与几何布局有关,而且也是时变量。这一点在本试验中也可以看出,本试验中多路径影响量级为数毫米。

3. 在静态 GPS 测站上,可以利用移动平均方法在坐标域中有效地探测多路径效应。
4. 在实际测量工作中,可根据实际情况采取相应的办法以削减多路径效应的影响。如何有效地通过数据处理的办法来消除多路径效应的影响有待进一步研究。

参考文献:

[1] ZHOU Zhong-mo, YI Jie-jun, ZHOU Qi. Principles and Applications of GPS Surveying [M]. Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping, 1995. (in Chinese)

[2] TOWNSEND B R, FENTON P C, *et al.* L1 Carrier Phase Multipath Error Reduction Using MEDLL Technology [R]. California: ION Palm Springs, 1995, 9.

[3] BRAASCH M S. Performance Comparison of Multipath Mitigating Receiver Architectures [J]. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2001, (3): 31 309-31 315.

[4] HUANG Ding-fa, DING Xiao-li, Chen Yong-qi, *et al.* Wavelet Filters Based Separation of GPS Multipath Effects and Engineering Structure Vibrations [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(1): 36-41. (in Chinese)

[5] ZHDANOV A, ZHODZISHSKY M, VEITSEL V, *et al.* Evolution of Multipath Error Reduction with Signal Processing [J]. GPS Solution, 2002, 5(3): 19-28.

[6] TOWNSEND B R, WIEBE J, *et al.* Analysis of the Multipath Meter Performance in Environments with Multiple Interferers [R]. Salt Lake City: ION GPS 2000, 2000, 9.

[7] CHEN Chun-sung, LEE Hsueh-chih. A Study of the Multipath Effect of the GPS Antenna [J]. Geomatics Research Australasia, 2002, 76(6): 37-58.

[8] GUO Jing-jun, SHANG Rui-bin, LI Yu-lin. The Study of Multipath Effects to GPS Positioning [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1995, (2): 46-49. (in Chinese)

[9] RAY J K, CANNON M E, FENTON P C. Mitigation of Static Carrier-Phase Multipath Effects Using Multiple Closely Spaced Antennas [J]. Journal of The Institute of Navigation, 1999, 46(3): 193-201.

[10] WANG Xiao-qiang. The Effects of Multipath Errors on GPS Surveying [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 2000, 20(1): 56-59. (in Chinese)