

# GPS 多路径重复性试验研究

钟萍<sup>①②</sup>, 袁林果<sup>①②</sup>, 丁晓利<sup>②</sup>

①西南交通大学 土木工程学院测量工程系, 成都 610034; ②香港理工大学 土地测量与地理咨询学系, 香港 九龙

**【摘要】**信号衍射和多路径效应是限制 GPS 定位精度进一步提高的瓶颈, 观测中两者往往同时存在。衍射效应具有不完全重复的特性, 为了研究多路径重复性并使其不受信号衍射的影响, 本文提出先应用 SIGMA-Δ 信噪比加权模型削弱信号衍射的影响, 再运用改进恒星时滤波法分析多路径重复性。实验观测资料分析表明, SIGMA-Δ 模型能有效削弱衍射信号对定位结果影响, 并且保留主要的多路径信号; 而改进恒星时滤波法能适应测站周围多路径环境的变化, 从而最大限度地削减多路径误差。两者组合比传统的恒星时滤波更能有效提高 GPS 的动态定位精度。

**【关键词】**GPS 多路径效应; 衍射; 重复性; 改进恒星时滤波

**【中图分类号】**P228.4

**【文献标识码】**A

**【文章编号】**1009-2307(2010) 02-0043-04

## 1 引言

对于动态 GPS 工程应用领域<sup>[1-3]</sup> (如: 结构健康监测、高动态 GPS 变形监测), GPS 的定位精度主要受限于不能通过差分技术消除的多路径和信号衍射误差。多路径效应是指 GPS 信号通过其他物体的反射或折射到达 GPS 接收机天线; 而信号衍射是指 GPS 卫星与接收机天线间的直线距离受障碍物遮挡而产生衍射, 其衍射信号到达接收机天线。产生多路径和衍射效应的信号对直接到达的 GPS 信号接收产生干扰, 影响码和相位的测量, 从而降低 GPS 的定位精度<sup>[4]</sup>。

在数据处理过程中, 通常为了增强卫星几何分布及缩短必要的观测时间, 而适当降低卫星的截止高度角, 从而造成观测噪声和系统误差增大, 因此需选择恰当的观测值随机模型。当衍射发生时, 接收机天线接收到的 GPS 信号通常具有较低的信噪比。因此, Brunner 等人<sup>[5]</sup>提出了 SIGMA-Δ 信噪比加权模型, 来削弱或消除衍射信号对定位结果的影响。同时, 为分离或削弱多路径效应的影响, 除尽量避开射频和环境干扰源, 选用抗干扰性能好的 GPS 接收天线, 以及完善发展 GPS 数据处理软件等方法外, 也可运用以多路径重复性为基础发展起来的恒星时滤波方法 (Sidereal Filtering 或 SF)<sup>[6-8]</sup>。最近的研究发现, 实际的轨道重复周期比通常认为的恒星时轨道重复周期 (236 s) 超前, 进而提出了“改进恒星时滤波法” (Modified Sidereal Filtering 或 MSF)<sup>[9, 10]</sup>。

由于多路径效应和衍射误差的影响, 目前 GPS 动态监测定位的精度一般为厘米级。为了最大限度地削减信号衍射和多路径误差, 实现毫米级的定位精度, 本文结合 GPS 观测试验研究了 SIGMA-Δ 模型用于削减信号衍射的特性, 分析比较了改进恒星时滤波法与传统的恒星时滤波法的多路径改正模型。

## 2 SIGMA-Δ 模型

GPS 信号的强度通常用于评价其观测质量的好坏, 它可用信噪功率谱密度比 C/N0 即信号载波的功率与噪声功率在 1 Hz 带宽中的比值来表示。一般来讲, C/N0 越大, 观测质量越好。SIGMA-Δ 模型用于削减衍射误差的原理是利用接收到的 C/N0 值及其模板值, 在最小二乘平差过程中降低受衍射误差影响的相位观测值的权, 以提高 GPS 的定位精度。下面本文将先简述 C/N0 模板的创建, 再给出降权模型。

对于相同的高度角和方位角, 由于受衍射影响信号的 C/N0 值较不受影响时小, 因此, 可得到卫星高度角与 C/N0 值间的关系曲线 (如图 1 中所示)。C/N0 的模板值可定义为在某高度角的观测中所获取 C/N0 的最大值, 它与测量中使用的天线类型有关<sup>[5]</sup>。

图 1 中由最大的 C/N0 构成的包迹线 (模板值) 即代表在本文第 3 节的 GPS 试验中参考站上所能获得的最佳信号观测质量。如用 Δ 表示对应于某高度角 C/N0 的测量值与其模板间的差值, 则可得到相位观测值的方差<sup>[5]</sup>:

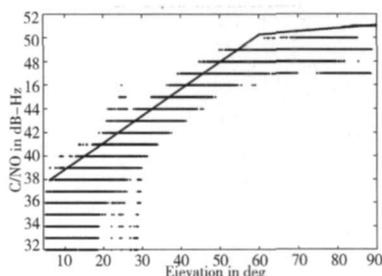


图 1 徕卡 AT504 扼流圈天线的 C/N0 值及其模板 (L1 相位观测值)

$$\sigma_{\Delta}^2 = C_i \times 10^{-(C/N0_{measured} - \alpha \Delta) / 10} \quad (1)$$

式中,  $i$  表示 L1 载波信号 (L1 或 L2);  $C_i$  的值可由接收机跟踪环的带宽确定 (本文分析中  $C_i$  的值为  $2.30 \times 10^4 \text{ m}^2$ );  $\alpha$  为经验常数, 通常取 2.0;  $\Delta = C/N0_{template} - C/N0_{measured}$  单位为 dB-Hz

通过公式 (1) 和误差传播律, C/N0 值可用于求解每个历元的双差相位观测值方差, 从而在平差过程中降低具有较小 C/N0 的观测值的权。

## 3 改进恒星时滤波法

由于 GPS 卫星的运行周期为半恒星日 (11 hr 58 min 2 s), 卫星每日运行两圈, 地球在惯性坐标系中转过  $360^\circ$ , 因此, GPS 卫星的地面轨迹具有恒星时重复性 (23 hr 56 min 4 s)。由于多路径效应主要取决于卫星、测站及反射面间的几何构型, 因此, 当接收机天线位置及周围环境保持不



作者简介: 钟萍 (1980-) 女, 四川成都人, 博士, 现主要从事卫星定位理论与应用研究。

E-mail: zphong@gmail.com

收稿日期: 2008-09-25

基金项目: 香港特别行政区研究资助局项目 (PolyU 5148/04E); 西南交通大学学科研启动基金 (编号: A0320502050901-2)

变时, 多路径效应也具有周期性变化的特点。

传统的恒星时滤波法利用 GPS 多路径效应的重复性, 先从观测资料中提取多路径模型, 再将后来的资料序列按最佳平移量作整体平移并求差, 来提高 GPS 定位的精度<sup>[6-9]</sup>。这里的最佳平移量可由恒星时周期近似代替, 也可由资料序列与多路径模型间相关系数最大时或其差值序列的 RMS 最小时所对应的时间来确定。最近的研究发现, GPS 卫星的地面轨迹并非具有严格意义上的恒星时周期, 且每颗 GPS 卫星的轨道重复周期也略有差别。Choi 等人<sup>[9]</sup>提出将坐标序列按观测时段内每颗卫星轨道重复周期的均值作整体平移并与多路径模型求差, 以削减多路径误差。该方法可进一步提高 GPS 的定位精度, 但观测时段内的可见卫星需保持不变。

Larson 等人<sup>[10]</sup>对其作了进一步改进, 用分段平移量代替单一的平移量以适应多路径环境的变化。为了区别传统的恒星时滤波法, 该方法被称为“改进恒星时滤波法”。实现改进恒星时滤波法的关键在于正确确定分段平移的步长, 关于步长的确定将在下一节中举例说明。分段平移步长确定后, 再求解各个分段的资料序列与多路径模型间的最佳平移量。在本文中, 改进恒星时滤波法的最佳平移量按如下方法确定: 先在一定范围内(如 240 ~ 251 s)逐历元地平移各分段的资料序列并与多路径模型求差, 然后计算差值序列的 RMS 值, 最后选取 RMS 达最小时的平移量为最佳平移量。

## 4 GPS 观测试验分析

为了研究长时间的多路径重复性变化以及如何运用该重复性最大限度地提高 GPS 定位的精度, 本文在香港理工大学某建筑物楼顶的两个观测墩上放置 GPS 接收机进行试验, 这里具有多处产生多路径信号的强反射面。从 2005 年 11 月 18 日(年积日为 322)至 28 日, 用 Septentrio PolRx2 @型 GPS 接收机在一条约为 11 m 的基线上以 1 Hz 采样率进行连续观测。数据解算时, 将一徠卡 AT504 型天线置于其中一个观测墩上作参考站; 另一轻型单频 GPS 天线作为流动站(如图 2 所示)。

GPS 数据处理采用事后动态解算, 逐个历元地解算出流动站在站心地平坐标系下的动态轨迹, 并在坐标域中分析多路径的重复性。解算时, 选用 12° 的卫星截止高度角。



图 2 试验中参考站和流动站的分布

### 4.1 衍射误差的削减

图 3 以第一天的位置估算结果为例, 给出了东、北和高程方向的坐标序列。从图 3 中可以看出, 三个方向上的坐标均多处出现了高达几厘米的跳变。为了统计这些跳变的影响, 本文将 3 倍坐标序列的四分位距(Interquartile Range 或 IQR)值作为奇异值边界(如图 3 中的水平线), 超出边界的数据点即为坐标奇异点。IQR 通常用于表示数据的离散程度, 它是第一四分位数和第三四分位数间的差

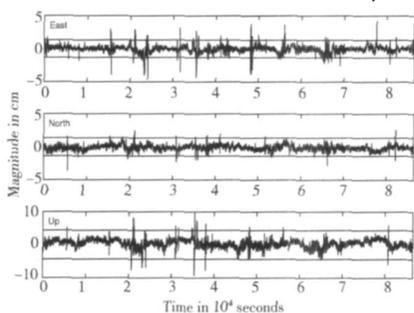


图 3 观测资料的坐标序列及奇异值边界

值, 即分布于资料序列中间 50% 的距离<sup>[11]</sup>。

通过对坐标估算结果的分析表明, 资料序列中的跳变值是由测站周围建筑(如新建的铁制围栏等)对 GPS 信号的衍射所致。为了使多路径效应的重复性不受衍射信号的影响, 本文将采用前文所提及的随机 SIGMA- $\Delta$  模型削减由衍射效应引起的坐标奇异值。图 4 给出了图 3 中的坐标序列经 SIGMA- $\Delta$  信噪比加权模型后的结果。衍射效应削减前后东、北和高程方向上坐标序列的中值、奇异值边界以及坐标奇异点占观测资料的百分比列于表 1 中。

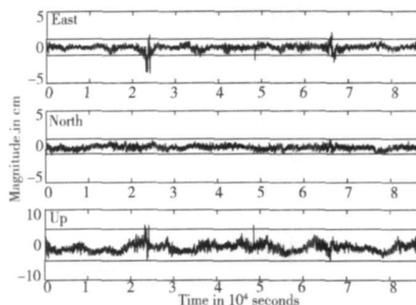


图 4 经 SIGMA- $\Delta$  模型改正后图 3 的坐标序列及奇异值边界

表 1 衍射效应削减前、后三个方向上定位结果的统计

	东		北		高程	
	前	后	前	后	前	后
中值 (cm)	0.010	-0.022	-0.120	-0.140	0.520	-0.808
奇异值边界 (cm)	1.320	1.017	1.380	1.047	4.380	4.497
奇异点百分比 (%)	1.90	1.06	0.38	0	0.43	0.06

从图 4 和表 1 中可以看出: 运用 SIGMA- $\Delta$  模型能使边界值以外的坐标奇异点数量显著减少, 水平方向上奇异值边界明显减小。从图 4 中还可以看出, 东方向上存在明显的两处跳变, 本文认为主要由观测过程中较差的卫星几何构型所致, 因两跳变处对应的可见卫星数较少且精度因子  $DOP > 4$ 。

为了说明衍射误差削减前、后资料序列中信号功率的变化, 图 5 给出了东、北和高程方向上采用 Welch 平均周期图方法(无数据重叠)和汉宁窗函数的功率谱密度估计。

图 5 的结果表明: 削减衍射误差后, 各方向上高频噪声的功率谱和频率介于 0.2 mHz 和 2 mHz 间的信号功率谱均有减小; 而信号频率介于 2 mHz 和 0.1 Hz 间的功率谱基本保持不变。这说明 SIGMA- $\Delta$  模型有效地降低了高频噪声, 并且保留了周期约为几十秒到几十分钟的多路径信号<sup>[13]</sup>。

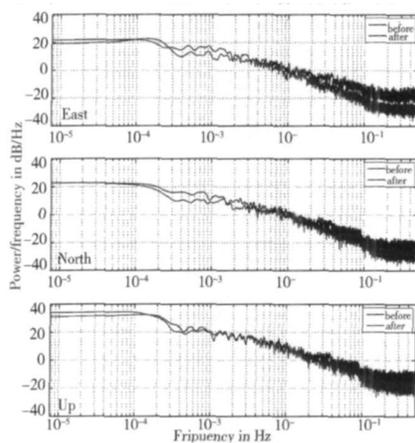


图 5 衍射效应削减前、后的功率谱密度

### 4.2 分段平移步长的确定

改进恒星时滤波法分段平移步长可由观测环境中主要的多路径周期变化率确定。下面本文以 2005 年 11 月 19 日(年积日为 323)北方向 1 小时的 GPS 观测资料为例, 说明如何选取合理的分段平移步长。图 6 中给出了平移步长分别为 64 128 256 和 512 s 时最佳平移量的 RMS 值。

从图 6 中可以看出: 平移步长较小(如 64 和 128 s)时

所对应的 RMS 值绝大多数小于平移步长较大 (256 和 512 s) 时的 RMS 值。虽然 64 s 的 RMS 值多数达最小, 但其变化较大。另外, 本文也对更小的平移步长 (如 16 和

32 s) 进行了分析。结果表明, 它们所对应的 RMS 值震荡剧烈, 为清晰起见, 在图 6 中并未给出。为确定分段平移步长, 图 7 给出了平移步长为 64 和 128 s 时的最佳平移量。从图 7 中可以看出: 128 s 所对应的最佳平移量变化较 64 s 时平稳。因此, 本文选用 128 s 作为分段平移的步长, 以获取较高的定位精度和较稳定的最佳平移量。

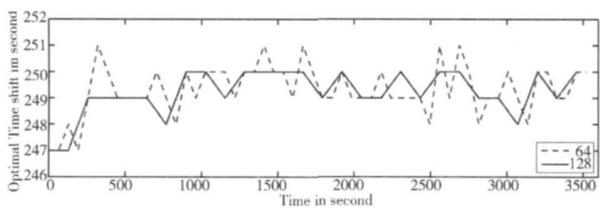


图 6 观测资料在选用不同平移步长时的 RMS 值

### 4.3 精度对比

为了说明 SIGMA-Δ 模型和改进恒星时滤波法的组合对多路径误差削减的有效性, 本文将其与传统的恒星时滤波法及 SIGMA-Δ 模型和恒星时滤波法的组合相比较。这里, 本文将第一天 (年积日为 322) 经 CVVF (Cross-Validation Vondrak Filter) 方法<sup>[8]</sup> 滤波去掉高频噪声后的坐标序列作为多路径模型, 并将坐标序列与多路径模型间差值序列的 RMS 最小作为恒星时滤波和改进恒星时滤波法最佳平移量的判定标准。

为节省篇幅, 本文将不给出经上述模型改正前、后各方向的坐标序列及其差值序列, 而仅给出精度对比的结果 (即坐标序列 RMS 变化的百分比)。图 8 为连续 10 天的 GPS 坐标序列在应用恒星时滤波 (SF)、SIGMA-Δ 模型和恒星时滤波法的组合 (SIGMA-Δ+SF), 以及 SIGMA-Δ 模型和改进恒星时滤波法的组合 (SIGMA-Δ+MSF) 后的精度比较。

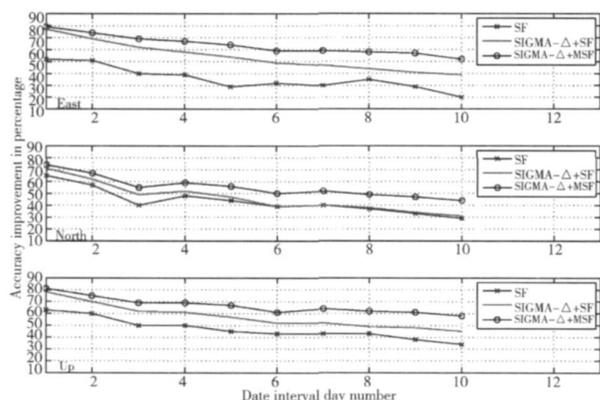


图 8 应用不同方法后 GPS 定位精度的提高与间隔天数的关系曲线

度, 且精度的提高随着与多路径模型间隔天数的增加而逐渐减小。这说明多路径信号的相关性随着间隔天数的增加而减小。同时, 图 8 的结果表明: 对存在衍射误差的原始坐标序列仅运用 SF 后的表现性能最差, 而应用 SIGMA-Δ+SF 可使 GPS 定位精度提高约 10-20%, SIGMA-Δ+MSF 的性能最佳, 其定位精度较 SIGMA-Δ+SF 进一步提高约 10%。例如, 当间隔天数为 10 天时, SIGMA-Δ+MSF 组合可使东、北和高程方向的定位精度分别提高约 52%、44% 和 58%。比较图 8 中的 SF 与 SIGMA-Δ+SF 关系曲线可以看出: 当间隔天数小于 5 时, SIGMA-Δ+SF 组合能更好地提高 GPS 的定位精度; 对比 SIGMA-Δ+SF 与 SIGMA-Δ+MSF 曲线可以看出, 随着间隔天数的增加, SIGMA-Δ+MSF 相对于 SIGMA-Δ+SF 的表现性能越好。这说明 SIGMA-Δ+SF 仅适用于提高短时期 (间隔天数 < 5) 观测资料的定位精度; 而 SIGMA-Δ+MSF 不仅适用于短时间的观测资料, 而且适用于较长时期的观测资料。

图 9 给出了最后一天 (年积日为 332) 北方向原始坐标序列的小波频谱, 同时, 为表明应用上述组合方法后资料序列的频域特性, 图中也给出了应用 SIGMA-Δ 模型, SIGMA-Δ+SF 及 SIGMA-Δ+MSF 后的小波频谱结果。从图 9 中可以看出: 与原始坐标序列的小波频谱相比, SIGMA-Δ 模型使高频噪声明显减小, 这与图 5 中的结果一致。将 SIGMA-Δ、SIGMA-Δ+SF 和 SIGMA-Δ+MSF 的结果相比可知: MSF 和 SF 均能有效削减长周期 (如 > 1000 s) 的多路径误差, 但 MSF 法能更好地削减短周期 (如 < 256 s) 的多路径效应影响。这说明短周期多路径信号的相关性比长周期多路径信号差, 改进恒星时滤波比恒星时滤波更适用于多路径误差的削减。

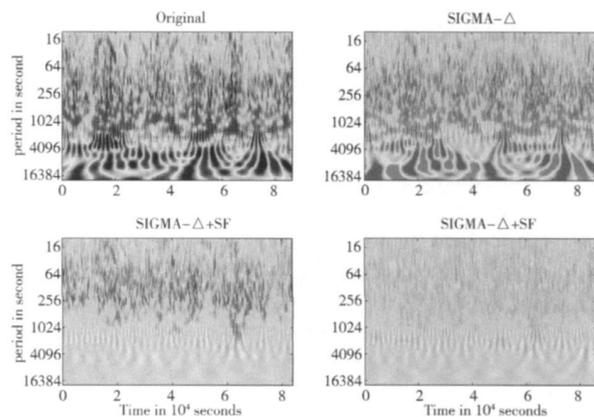


图 9 北方向上原始坐标序列及应用组合法后的小波频谱

### 5 结束语

在 GPS 多路径重复性实验研究中, 本文提出应用 SIGMA-Δ 模型比加权模型和改进恒星时滤波的组合削减信号衍射和多路径误差, 从而提高 GPS 的动态定位精度。通过对实验观测资料的分析, 可以得到如下结论:

- 1) 在多路径模型改正前, 应用 SIGMA-Δ 随机模型能有效地削减信号衍射误差, 并且保留主要的多路径信号。
- 2) 多路径信号的相关性随着与多路径模型间隔天数的增加而减小, 且信号周期越短, 相关性越差。改进恒星时滤波法能最大限度地削减短周期的多路径效应误差。
- 3) SIGMA-Δ 模型能有效地降低高频噪声, 而改进恒星时滤波法不仅适用于提高短时期观测资料的定位精度, 而且更适用于较长时期的观测资料。两者的组合在提高 GPS 定位精度上的性能明显优于恒星时滤波及 SIGMA-Δ 模型与恒星时滤波的组合。

(下转第 26 页)

图普通用户、电子地图高级用户、电子地图设计者、电子地图专家，同时也采集了被测人员的单位信息(如图6)。

其次，要注意测试时应当尽量模拟符号实际的使用环境。因为使用环境不同对符号的要求不同，如在室内看起来色彩明艳突出的电子地图在室外阳光照射下就不一定能看清楚，在正常光线下色彩搭配协调的地图在野营帐篷里由于光线的不同会产生偏色。

### 4 结束语

软件的可用性是衡量软件优劣程度的重要指标，近年来随着社会的发展以及人们思想的不断进步，对于人性化、个性化、实用性产品的追求将成为一个大趋势。以可用性理论为指导来设计基础电子地图符号测试系统，有利于被测人员方便准确地表达自己的感受，有利于测试人员收集真实有效的信息，对于提高制图人员和用图人员认知的一致性，促进基础电子地图符号标准更完善、更全面地发展

具有重要意义。

### 参考文献

[ 1 ] 任忠斌, 陈毓芬, 孙庆珍. 电子地图可用性评价的内容与方法 [ J ] . 海洋测绘, 2007 27 ( 5 ) .

[ 2 ] 江南, 代亚贞, 郑海鹰, 夏丽华. 基于多种显示模式的电子地图符号体系的设计 [ J ] . 测绘科学, 2007 32 ( 3 ) .

[ 3 ] 凌云, 陈毓芬, 王英杰. 基于用户认知特征的地图可视化系统自适应用户界面研究 [ J ] . 测绘学报, 2005 34 ( 3 ) .

[ 4 ] 谢文阁. 浅谈如何提高应用程序的可用性 [ J ] . 锦州医学院学报, 2000 21 ( 1 ) .

[ 5 ] 周玲. 网站的可用性界面设计初探 [ J ] . 商场现代化, 2008 总第 531 期 .

### Design and realization of electronic map symbols testing system

**Abstract** Electronic map symbols testing system is very beneficial to improve the information transmission efficiency of electronic map symbols to get the coherence and veracity of cognition and to promote the development of electronic map symbols at the aspects of theory study and practical application. This paper analyzed the existing problems in the system and discussed the usability of it. At last it studied the design techniques of electronic map symbols testing system including function design, interface design, testing items design and testing environment design. The system was realized by VC++.

**Key words** electronic map symbols testing system; usability; visual variables

CAO Ya-ni<sup>①</sup>, JIANG Nan<sup>①</sup>, ZHANG Wei<sup>②</sup>, WANG Ju<sup>③</sup> ① Institute of Surveying and Mapping Information Engineering University Zhengzhou 450052 China ② Troops 61512 Beijing 100088 China ③ Troops 61139 Beijing 100091, China)

(上接第 45 页)

### 参考文献

[ 1 ] Genrich J F, Bock Y. Instantaneous Geodetic Positioning with 10-50 Hz GPS Measurements: Noise Characteristics and Implications for Monitoring Networks [ J ] . Journal of Geophysical Research, 2006 111: B03403.

[ 2 ] 黄丁发, 丁晓利, 陈永奇, 等. GPS 多路径效应影响与结构振动的小波滤波筛分研究 [ J ] . 测绘学报, 2001 30 ( 1 ) .

[ 3 ] 钟萍, 等. GPS 结构振动监测数据滤波方法及其性能实验研究 [ J ] . 测绘学报, 2007 36 ( 1 ) .

[ 4 ] Leick A. GPS Satellite Surveying ( 3<sup>rd</sup> edn ) [ M ] . New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2004.

[ 5 ] Brunner F K, Hartinger H, Troyer L. GPS Signal Diffraction Modelling: the Stochastic SIGMA-Δ Model [ J ] . Journal of Geodesy, 1999 73.

[ 6 ] Eibseguir P, Davis J L, Jaldehag R T K, et al. Geodesy Using the Global Positioning System: the Effects of Signal Scattering on Estimates of Site Position [ J ] . Journal of Geophysical Research, 1995 100.

[ 7 ] Wuibena G, Bagge A, Boettcher G, et al. Permanent

Object Monitoring with GPS with 1 Millimeter Accuracy [ C ] // Proceedings of ION GPS-2000 2000 1000-1008.

[ 8 ] Zheng D W, Zhong P, Ding X L, et al. Filtering GPS Time Series Using a Vondrak Filter and Cross-Validation [ J ] . Journal of Geodesy, 2005 79.

[ 9 ] Choi K, Bilich A, Larson K M, et al. Modified Sidereal Filtering: Implications for High-Rate GPS Positioning [ J ] . Geophysical Research Letters, 2004 31: L22608.

[ 10 ] Larson K M, Bilich A, Axelrad P. Improving the Precision of High-Rate GPS [ J ] . Journal of Geophysical Research, 2007 112: B05422.

[ 11 ] Bock Y, Nikolaidis R M, de Jonge P J, et al. Instantaneous Geodetic Positioning at Medium Distances with the Global Positioning System [ J ] . Journal of Geophysical Research, 2000 105.

[ 12 ] 郭杭, 等. GPS 多路径效应实例计算与分析 [ J ] . 测绘科学, 2006 31 ( 5 ) .

[ 13 ] 黄声享, 李沛鸿, 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 ) .

### Experimental analysis of GPS multipath day-to-day repeatability

**Abstract** Signal diffraction and multipath disturbance are bottleneck problems that limit accuracy of Global Positioning System (GPS) positioning, both of which tend to exist simultaneously. However, the day-to-day repeatability of signal diffraction is not obvious. To take advantage of the day-to-day repeating property of GPS multipath signals and make it not affected by diffraction effects, this paper used the stochastic SIGMA-Δ model to reduce the effects of signal diffraction and then applied the modified sidereal filtering to analyze the multipath repeatability. Experiments with real GPS observations showed that the SIGMA-Δ model could achieve a balance between reducing the diffraction effects and keeping the main multipath signals. The modified sidereal filtering used time-varying and site-dependent shifts to fully mitigate the multipath errors. It was shown that integrating the two techniques was more effective in improving the dynamic GPS accuracy than the traditional sidereal filtering.

**Key words** GPS; multipath effects; diffraction; repeatability; modified sidereal filtering (MSF)

ZHONG Ping<sup>②</sup>; YUAN Lin-guo<sup>②</sup>; DING Xiao-li<sup>①</sup> ① Department of Surveying Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China ② Department of Land Surveying and Geo-Informatics, Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong)