

基于动态单点定位的 GPS 数据质量指标研究

李国伟¹, 郭金运^{1,2}, 王书阳¹, 宗 干¹

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 海岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要:利用 Bernese 模拟 GPS 观测数据研究了精度因子(DOP)、L1 伪距多路径效应(MP1)、L2 伪距多路径效应(MP2)以及观测数据和周跳比(O/SLPS) 4 种质量指标,并分析了它们与动态单点定位精度之间的相关性。模拟试验表明:精度因子对动态单点定位精度的影响较小,伪距多路径效应和周跳个数对动态单点定位精度影响较大。利用平滑伪距进行动态单点定位,伪距多路径效应 MP1、MP2 的阈值约 0.500 m,不进行平滑处理,伪距多路径效应 MP1、MP2 阈值约 0.300 m。观测数据和周跳(O/SLPS)比值的阈值约 670。

关键词:全球定位系统;Bernese;数据质量指标;动态单点定位

中图分类号:P228.4

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2013)03-0089-06

GPS Data Quality Indicators Based on Kinematic Point Positioning

Li Guowei¹, Guo Jinyun^{1,2}, Wang Shuyang¹, Zong Gan¹

(1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef, SBSM, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Four data quality indicators, including the dilution of precision (DOP), L₁ pseudorange multipath (MP1), L₂ pseudorange multipath (MP2) and observation per slip (O/SLPS), were studied using the simulated GPS data generated by Bernese Software, and the correlation between these indicators and the kinematic point positioning precision was also analyzed. The simulation result indicates that DOP has little effect on the positioning precision, while pseudorange multipath (MP1 and MP2) and cycle slips (O/SLPS) have more effect on it. Based on the kinematic point positioning, the thresholds of MP1 and MP2 are around 0.500 m using smoothed pseudorange and around 0.300 m using the pseudorange without smoothing, and the threshold of O/SLPS ratio is around 670.

Key words: GPS; Bernese; data quality indicators; kinematic point positioning

GPS(全球定位系统, Global Positioning System)定位精度取决于高质量的观测数据和正确的随机模型,而研究原始观测数据的质量才能得出正确的随机模型^[1]。因此,分析原始数据的质量是实现 GPS 高精度定位的基础。目前, GPS PPP(精密单点定位, GPS precise point positioning) 理论技术已相对成熟,不同于传统的相对定位方式,单点定位不能通过差分技术消除电离层延迟、对流层延迟以及钟差等误差的影响。要实现可靠而高精度的单点定位, GPS 数据质量尤为重要。

收稿日期:2012-06-27

基金项目:国家自然科学基金项目(40974004);现代工程测量国家测绘地理信息局重点实验室基金项目(TJES1101);海岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室基金项目(2011A01);山东科技大学研究生科技创新基金项目(YCA110203)

作者简介:李国伟(1986—),男,山东东营人,硕士研究生,主要从事卫星定位与导航技术方面的研究。

E-mail:guoweili86@126.com

郭金运(1969—),男,山东菏泽人,教授,博士生导师,主要从事空间大地测量和地球重力场的相关研究。

E-mail:jinyunguo1@126.com

GPS 测量中的各种误差会对观测数据的质量产生影响,为了综合反映数据质量,需要选取合适的^[2]数据质量指标。国外学者对观测数据的完整程度^[3]、周跳和粗差^[4]以及卫星星历信息^[5]进行了研究。数据质量指标多用于进行 GPS 连续运行站网的监测与管理,判断 GPS 站运行是否正常^[6]。有学者进行了星载 GPS 数据预处理研究,提出了星载 GPS 钟差、周跳、多路径效应等处理的流程^[7]。还有学者研究了星载 GPS 数据质量对定轨精度的影响^[8]。叶大纲^[9]探讨了 5 项观测数据质量指标与基线解算精度之间的相关性,以此选取合适的^[9]数据质量指标。针对不同的定位方式,质量指标与定位精度的相关性还有待研究。在此基础上,如何合理地选取数据质量指标并确定其阈值,以有效地反应 GPS 原始数据质量对定位精度的影响是亟待解决的问题。

本研究基于动态单点定位方式,利用 Bernese 软件模拟 GPS 观测数据,研究精度因子(DOP, dilution of precision)、 L_1 伪距多路径效应(MP_1)、 L_2 伪距多路径效应(MP_2)以及观测数据和周跳比(O/SPLPS) 4 种质量指标,确定数据质量指标与动态单点定位精度之间的相关性,并对数据质量指标的阈值进行初步研究。

1 精度因子研究

利用 GPS 进行单点定位,其精度取决于 2 个因素:①所测卫星在空间的几何分布,通常称为卫星几何分布的几何图形;②观测量的精度^[10]。观测量精度一定的情况下,所观测卫星的几何分布是影响定位精度的重要因素。精度因子(DOP)是反映卫星在空间几何分布的指标,其计算方法有很多种^[11]。在空间直角坐标系中,伪距动态定位误差方程的设计矩阵用 A 表示,设计矩阵内元素只与卫星位置和测站位置有关。相应的权系数阵^[10]为

$$Q = (A^T A)^{-1} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{bmatrix} \quad (1)$$

几何精度因子: $GDOP = (q_{11} + q_{22} + q_{33} + q_{44})^{\frac{1}{2}}; \quad (2)$

空间位置精度因子: $PDOP = (q_{11} + q_{22} + q_{33})^{\frac{1}{2}}; \quad (3)$

平面位置精度因子: $HDOP = (q_{11} + q_{22})^{\frac{1}{2}}; \quad (4)$

高程精度因子: $VDOP = (q_{33})^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$

DOP 值反映的是测距信号统计量和位置参数统计量之间的误差传播关系^[12]。点位误差是测距误差与水平精度因子(HDOP, horizontal dilution of precision)及垂直精度因子(VDOP, vertical dilution of precision)的乘积^[13]。

分析卫星分布情况对定位精度的影响,要排除相位和伪距观测质量的影响。接收机一般最多同时跟踪 12 颗卫星,用 Bernese 软件^[14]根据接收机的性能模拟观测数据,此时卫星分布比较理想,称为理想卫星分布情况下的模拟数据。将 IGS(International GNSS Service)站实际观测文件中各历元卫星的相位和伪距观测量替换为模拟观测量,各历元可见卫星不变,得到实际卫星分布情况下的模拟数据。本文以 KUNM 站 2007 年 DOY001 为例,由于模拟数据中无接收机钟差影响,计算 2 种情况下 PDOP、HDOP、VDOP 值如图 1 所示。理想情

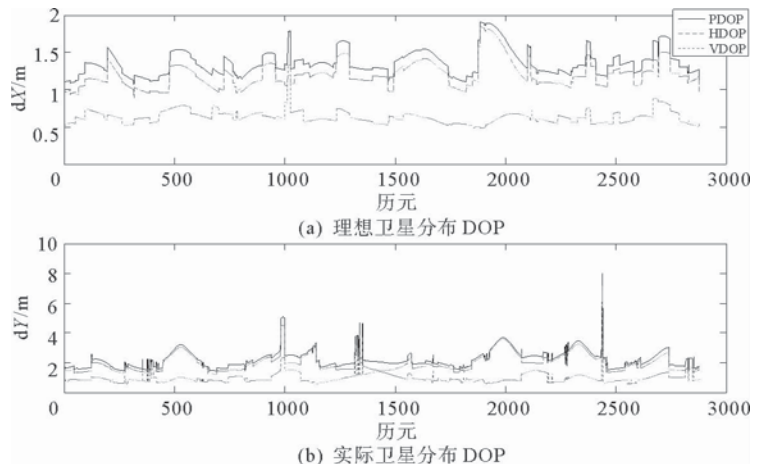


图 1 KUNM 站 DOY001 理想和实际卫星分布情况下的精度因子(DOP)图
Fig. 1 DOP calculated for the ideal (up) and actual (down) GPS satellite distribution at station KUNM of DOY001, 2007

况下 PDOP 的最大值为 1.9, 卫星分布情况很好。实际情况下 PDOP 的最大值为 8.0, 卫星分布情况比理想情况下差。

在相位观测值中加入标准差为 0.003 m 的随机误差, 并在伪距中加入标准差为 0.300 m 的随机误差, 进行理想卫星分布和实际卫星分布 2 种情况下的动态单点解算, 解算过程中采用精密星历, 分别计算单历元解算坐标在 X、Y、Z 三个方向上相对于精确坐标的偏差值以确定精度。利用相位进行动态单点定位的偏差值如图 2 所示, 统计结果见表 1。利用平滑伪距进行动态单点定位的偏差值如图 3 所示, 统计结果见表 2。由图 2 和图 3 可知, 在精度因子发生跳变的历元, 相应的解算坐标的偏差也会出现跳变。由表 1 和表 2 可知, 在卫星几何分布不佳的情况下, 无论是利用相位观测量, 还是伪距观测量, 动态单点定位的精度均明显下降。由上述分析可知, 精度因子是分析动态单点定位精度的重要指标。

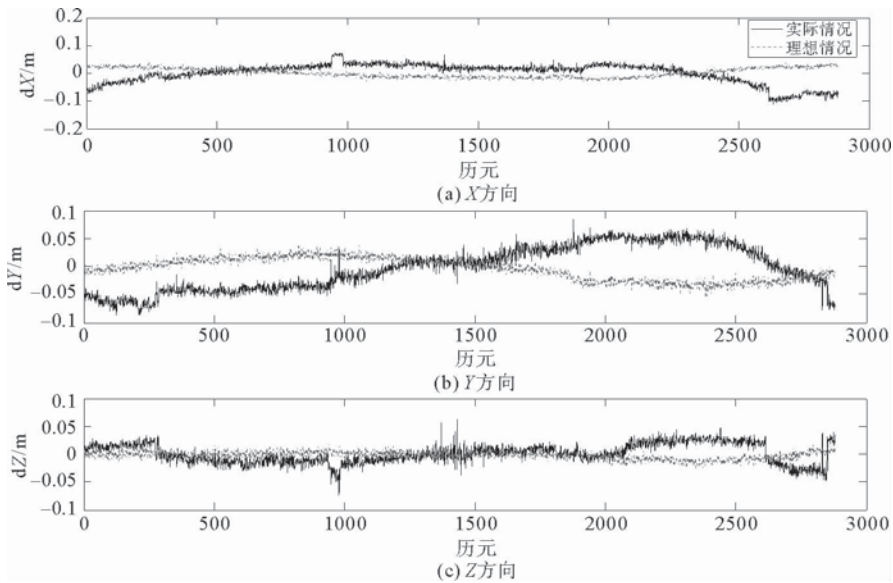


图 2 不同卫星分布情况下模拟数据相位动态单点定位偏差值图

Fig. 2 The displacements in X,Y and Z direction calculated by phase kinematic point positioning for the different GPS satellite distribution

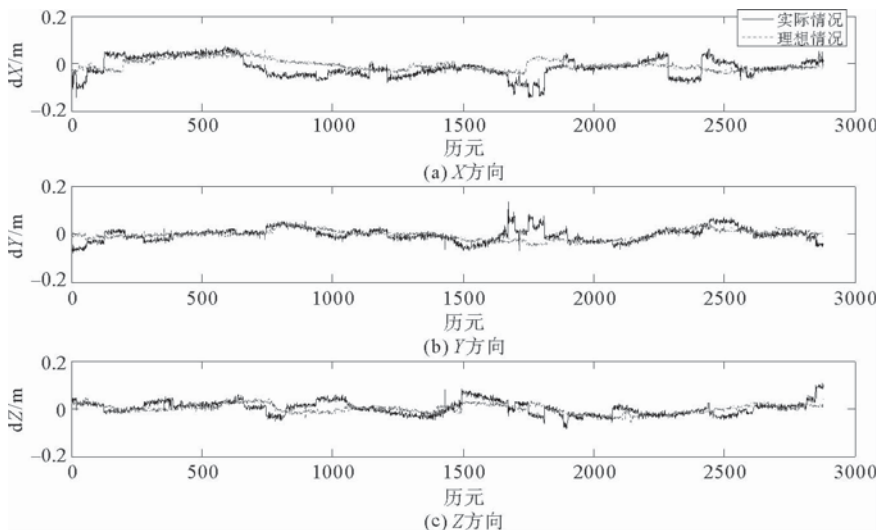


图 3 不同卫星分布情况下模拟数据平滑伪距动态单点定位偏差值图

Fig. 3 The displacements in X,Y and Z direction calculated by smoothed pseudorange kinematic point positioning for the different GPS satellite distribution

表 1 不同卫星分布情况下相位动态单点定位偏差值统计表

Tab. 1 The statistics of the displacements calculated by phase kinematic point positioning for the different GPS satellite distribution

条件	方向	max	min	mean	std(标准差)	rms(中误差)
理想卫星分布	dX	0.0377	-0.0319	0.0011	0.0164	0.0165
	dY	0.0389	-0.0575	-0.0045	0.0197	0.0203
	dZ	0.0214	-0.0258	-0.0018	0.0070	0.0072
实际卫星分布	dX	0.0738	-0.1093	-0.0002	0.0354	0.0354
	dY	0.0847	-0.0861	-0.0028	0.0396	0.0397
	dZ	0.0641	-0.0731	0.0009	0.0175	0.0175

表 2 不同卫星分布情况下平滑伪距动态单点定位偏差值统计表

Tab. 2 The statistics of the displacements calculated by smoothed pseudorange kinematic point positioning for the different GPS satellite distribution

条件	方向	max	min	mean	std(标准差)	rms(中误差)
理想卫星分布	dX	0.0581	-0.0517	-0.0052	0.0225	0.0231
	dY	0.0576	-0.0597	-0.0028	0.0206	0.0208
	dZ	0.0474	-0.0549	-0.0003	0.0184	0.0184
实际卫星分布	dX	0.0711	-0.1435	-0.0169	0.0401	0.0435
	dY	0.1350	-0.0780	-0.0026	0.0276	0.0277
	dZ	0.1094	-0.0826	0.0026	0.0282	0.0284

2 多路径效应研究

多路径效应是在发射 GPS 信号的卫星、接收机天线及天线附近物体间构成的某种相对空间关系环境下,产生的合成信号相对于直达接收机天线信号的一种延迟现象^[15]。多路径效应是反应 GPS 观测数据质量的重要指标。多路径效应分为伪距多路径效应和相位多路径效应。多路径效应的分离计算一直是一个国际性的难题^[17],目前比较常用的方法是进行观测值的线性组合,以取均值的方式移去整周模糊度的影响,因为相位多路径效应和噪声很小,最后计算结果为伪距多路径效应和噪声^[18]。多路径效应的计算公式为:

$$MP_1 = P_1 - \left(1 + \frac{2}{\alpha - 1}\right)\phi_1\lambda_1 + \left(\frac{2}{\alpha - 1}\right)\phi_2\lambda_2 =$$

$$M_1 - \left(1 + \frac{2}{\alpha - 1}\right)n_1\lambda_1 + \left(\frac{2}{\alpha - 1}\right)n_2\lambda_2 - \left(1 + \frac{2}{\alpha - 1}\right)m_1 + \left(\frac{2}{\alpha - 1}\right)m_2; \quad (6)$$

$$MP_2 = P_2 - \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1}\right)\phi_1\lambda_1 + \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1} - 1\right)\phi_2\lambda_2 =$$

$$M_2 - \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1}\right)n_1\lambda_1 + \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1} - 1\right)n_2\lambda_2 - \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1}\right)m_1 + \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1} - 1\right)m_2. \quad (7)$$

其中: $\alpha = (f_1/f_2)^2$, f_1, f_2 — L_1 和 L_2 载波频率; P_1, P_2 —伪距观测量; ϕ_1, ϕ_2 —相位观测量; λ_1, λ_2 — L_1 和 L_2 载波的波长; n_1, n_2 — L_1 和 L_2 载波相位的整周模糊度; $M_1 - P_1$ 的伪距多路径效应和接收机噪声; $M_2 - P_2$ 的伪距多路径效应和接收机噪声; $m_1 - L_1$ 的相位多路径效应和接收机噪声; $m_2 - L_2$ 的相位多路径效应和接收机噪声。习惯将伪距多路径效应在一定时间窗口内均方根(rms, root mean square)作为反应观测数据质量的指标^[16](MP_1 -rms, MP_2 -rms)。

用 Bernese 模拟 BJFS 站 2007 年 DOY167 的观测数据,用式(6)、式(7)计算该天实测数据伪距多路径效应。将伪距多路径效应乘以不同的倍数加到模拟数据中,加入不同倍数的伪距多路径效应形成 12 组数据,

不加入其他任何误差,利用未平滑伪距和平滑伪距分别进行动态单点定位,计算单历元解算坐标在 N,E,U 三个方向上相对于精确坐标的偏差值,计算三个方向总的 RMS ($RMS = \sqrt{rms_N^2 + rms_E^2 + rms_U^2}$)。由表 3 可知,随着伪距多路径效应的逐渐增大,未平滑伪距单点定位的精度逐渐下降,当 MP_1 -rms、 MP_2 -rms 分别达到 0.287 m、0.309 m 时,未平滑伪距定位精度降到米级($RMS=1.090$ m)。利用相位对伪距进行平滑,可消除伪距多路径效应和接收机噪声的影响,所以平滑伪距单点定位的精度下降速度较慢,当 MP_1 -rms、 MP_2 -rms 分别达到 0.494 m、0.522 m 时,平滑伪距定位精度降为分米级($RMS=0.111$ m)。式(6)、式(7)的计算结果包含多路径效应和接收机噪声,为影响伪距质量的主要因素。由数据试验可知,多路径效应与动态单点定位精度成负相关,合理控制多路径效应能有效地提高精度。

伪距多路径效应作为数据质量评价的指标,其阈值确定一般按照 IGS 公布的统计结果,并没有从定位精度的角度确定其阈值。本文通过模拟实验可以得出,在理想条件下 MP_1 -rms、 MP_2 -rms 的值低于 0.300 m 时,可达到分米级定位精度;采用平滑措施, MP_1 -rms、 MP_2 -rms 的值低于 0.500 m 时,可达到厘米级定位精度。上述结论是采用观测数据只包括多路径效应误差且采用精密定位软件(Bernese)进行解算得出的结论,实际观测时受多种误差因素的影响阈值可能变大。

3 周跳研究

周跳是由于卫星信号的失锁或其他软硬件和环境原因,使载波相位差观测值中的整周计数所发生的突变,可反映相位观测数据质量,一般采用每周跳完整观测数据数目(O/SLPS)作为数据质量评价的指标。周跳探测与修复方法有很多种,TurboEdit算法是单站周跳探测的成熟算法^[20],Bernese,Gamit,Gipsy等高精度 GPS 数据处理软件中均有各自的周跳探测和修复方法^[19],另外,实时周跳探测的算法也被用于 GPS 数据质量的实时监测^[21]。

本次试验在模拟数据中加入不同个数的周跳,周跳的大小(最大不超过 200 周)和位置随机确定,形成 10 个对照组,进行相位动态单点定位,计算各历元解算坐标(NEU)相对于精确坐标的偏差值,并计算三个方向上总的 RMS ,如表 4 所示。Bernese 进行相位动态单点定位时,探测完周跳后不进行修复,而是将周跳设为整周模糊度,作为未知数和坐标一起解算^[14]。表 4 中,当没有周跳时,整周模糊度的数目为 73,当周跳数分别为 2,4,10 时,整周模糊度数分别为 75,77,83,即没有周跳时的整周模糊度数加上周跳数,说

表 3 未平滑和平滑伪距动态单点定位精度统计表

Tab. 3 The precision of the raw and smoothed pseudorange kinematic point positioning m

编号	MP_1 -rms	MP_2 -rms	未平 RMS	平滑 RMS
1	0.004	0.007	0.001	0.015
2	0.042	0.045	0.158	0.018
3	0.084	0.089	0.318	0.027
4	0.126	0.133	0.468	0.038
5	0.168	0.178	0.623	0.049
6	0.209	0.222	0.790	0.061
7	0.250	0.271	0.934	0.073
8	0.287	0.309	1.090	0.085
9	0.336	0.350	1.347	0.096
10	0.379	0.385	1.404	0.097
11	0.415	0.433	1.557	0.097
12	0.494	0.522	1.866	0.111

表 4 不同数目周跳情况下相位动态单点定位精度统计表

Tab. 4 The precision of the phase kinematic point positioning with different numbers of cycle slips

编号	周跳个数	O/SLPS	解算时整周模糊度数目	可解算历元数	RMS/m
1	0		73	2880	0.0004
2	2	12055	75	2880	0.0004
3	4	8037	77	2880	0.0004
4	10	3444	83	2880	0.0004
5	20	1418	88	2874	0.0004
6	40	670	101	2871	0.3487
7	80	377	126	2862	0.2898
8	100	287	147	2846	0.2640
9	150	185	182	2837	0.3482
10	300	84	284	2722	0.1500

明了 Bernese 进行相位动态单点定位时对周跳的处理策略。当加入的周跳数多于 10 个时,上述规律不存在,这是因为 Bernese 在周跳较多的情况下,对某些历元的数据进行了剔除,可解算出坐标的历元数减少。

鉴于 Bernese 处理周跳的策略,将可解算的历元数的统计结果作为分析精度的两个依据。如表 4 所示,当加入的周跳 ≤ 10 时,N,E,U 三个方向上可解算历元数均为 2880,定位精度为 0.0004 m,与不加入周跳时的精度一样;当加入 20 个周跳时,定位精度没有变化,但可解算历元数变为 2874;当加入 40 个周跳时,定位精度降到 0.3487 m,可解算历元数减少为 2871;当周跳 > 40 时,可解算历元数随着周跳数的增加而明显减少,定位精度虽然没有与周跳数呈负相关关系,如周跳为 300 个时,定位精度虽然为 0.1500 m,但这是在剔除了 78 个不可解算的历元后的统计结果。综合分析可解算历元数和定位精度 2 个指标,可以得出周跳数目的增加使动态单点定位精度降低的结论。通过以上分析,当周跳个数为 40 时,动态单点定位的精度开始明显降低,数据质量指标 O/SLPS 的阈值约为 670。该阈值在理想模拟观测条件下得出,同时考虑到 Bernese 软件的周跳处理策略,该阈值具有局限性,但也有一定参考价值。

4 结论

合理评价原始观测数据的质量是实现高精度定位的前提。本文利用 Bernese 模拟观测数据,将影响观测数据质量的 4 种误差源分别加入观测数据,对精度因子(DOP)、 L_1 伪距多路径效应(MP_1)、 L_2 伪距多路径效应(MP_2)和观测数据和周跳比(O/SLPS) 4 个质量指标进行了分析,研究了它们与动态单点定位精度之间的数值相关性。模拟试验表明:

1)精度因子对动态单点定位的影响在厘米量级上,当精度因子出现大的跳变时,相应历元的动态单点定位结果也出现跳变。

2)伪距多路径效应对伪距动态单点定位精度影响较大,伪距经平滑处理后多路径效应对定位精度的影响变小。观测数据中只含多路径效应误差,进行平滑处理,伪距多路径效应 MP_1 、 MP_2 的阈值约 0.500 m,不进行平滑处理,伪距多路径效应阈值约为 0.300 m。

3)周跳数对动态单点定位精度的影响程度与数据处理软件的解算策略有关系。本文以精密定位软件 Bernese 进行相位动态单点定位解算,确定每周跳完整观测数据数目(O/SLPS)的阈值约为 670。

参考文献:

- [1]Fuller S, Collie P, Kealy A. Real time quality assessment for CORS networks[J]. Journal of Global Positioning Systems, 2005, 4(1): 223-229.
- [2]Yeh T K, Chen C S. Constructing a system to monitor the data quality of GPS receivers[C]//International Association of Geodesy Symposia. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, August 22-26, 2007: 222-228.
- [3]Jonkman N F, De Jong C D. Integrity monitoring of IGEX-98 Data, Part I: Availability[J]. GPS Solutions, 2000, 3(4): 10-23.
- [4]Jonkman N F, De Jong C D. Integrity monitoring of IGEX-98 Data, Part II: Cycle slip and outlier detection[J]. GPS Solutions, 2000, 3(4): 24-34.
- [5]Jonkman N F, De Jong C D. Integrity monitoring of IGEX-98 Data-Part III: Broadcast navigation message validation[J]. GPS Solutions, 2000, 4(2): 45-53.
- [6]Brown N, Kealy A, Millner J, et al. Quality control and integrity monitoring of the victorian GPS reference station network [C]//FIG XXII International Congress. Washington D. C. USA: International Federation of Surveyors, 2002: 19-26.
- [7]郭金运,常晓涛,刘新. 星载 GPS 观测数据预处理模型研究[J]. 测绘科学, 2006, 31(3): 62-64.
Guo Jinyun, Chang Xiaotao, Liu Xin. Study on GPS Data preprocessing models onboard satellite[J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(3): 62-64.
- [8]Hwang C W, Tseng T P, Lin T J, et al. Quality assessment of FORMOSAT-3/COSMIC and GRACE GPS observables: Analysis of multipath, ionospheric delay and phase residual in orbit determination[J]. GPS Solution, 2010, 14: 121-131.
- [9]叶大纲. GPS 接收仪资料品质监控系统及校正系统之建立[D]. 台湾: 国立交通大学, 2005: 55-63.
- [10]周忠谟,易杰军,周琪. GPS 卫星测量原理及应用[M]. 北京: 测绘出版社, 1997: 117-120.
- [11]Shing H D. A closed-form formula for GPS GDOP computation[J]. GPS Solution, 2009, 13(3): 183-190.