

GPS观测数据处理方法的实验研究

陈永奇 A.契尔赞诺夫斯基*

摘 要

本文用实验研究方法探讨工程测量中GPS观测数据处理的几个问题,得出如下结论:载波相位二次差的精度与基线长度有关,采用网的整体平差方法处理GPS观测值时需要考虑这个问题;引进相位二次差间的数学相关不一定能改善成果的精度;电离层延迟影响可不必考虑,但对流层延迟的不同模拟方法对成果影响很大;如果观测质量优良,应尽可能把“整波长数”的解约束为整数,以提高基线解的精度。

【关键词】 全球定位系统; 数据处理; 实验研究

引 言

目前,尽管GPS还处在试验阶段,但已引起测绘界极大的重视。工程测量将是GPS的一个广阔市场,除了用于建立各种三维控制网外,还用于道路测量,河海测量,地籍测量,变形观测,高精度工程测量等等。为了研究工程测量和矿山测量中GPS的应用问题,笔者从1985年起开始了一个联合研究计划,研究内容主要包括:研制GPS观测数据处理软件;建立试验网,用于检验在工程测量作业环境中,各种接收机的性能和精度;综合GPS测量和常规地面测量手段进行变形观测,目前主要在委内瑞拉进行油田地面沉降监测;为满足工程测量高精度的要求,研究减弱低空对流层延迟影响的措施。在这篇论文中,笔者主要探讨数据处理方法的几个问题,包括载波相位观测二次差的精度以及它们的数学相关问题,大气延迟改正方法,以及“整波长数”的解法等。由于这几个问题难于从理论直接探讨,因此本文采用实验研究方法,通过对实际观测数据的不同处理,比较所得的结果,寻找规律性。所用的数据是TI-4100接收机在一个试验网上(称为UNB试验网)采集的。

收稿日期: 1988-01-12

* A. 契尔赞诺夫斯基博士是加拿大新不伦维克大学教授, 武汉测绘科技大学名誉教授。

1 数据处理的数学模型

设两台接收机 α 和 β 在 t 时刻同时跟踪观测卫星 i 和 j ，由观测的载波相位求得二次差 $\Delta^2\Phi_{\alpha\beta}^{ij}(t)$ ，它表示为^[3]

$$v_{\alpha\beta}^{ij}(t) = \Delta^2\rho_{\alpha\beta}^{ij}(t) + \lambda\Delta^2N_{\alpha\beta}^{ij} - \Delta^2\Phi_{\alpha\beta}^{ij}(t), \quad \forall i, j \quad (1)$$

式中 λ 是载波波长； $v_{\alpha\beta}^{ij}(t)$ 是相位二次差的观测误差； $\Delta^2\rho_{\alpha\beta}^{ij}(t)$ 是卫星—接收机间几何距离的二次差，是卫星位置矢量 $\underline{r}^i(t)$ ， $\underline{r}^j(t)$ 和接收机位置矢量 \underline{R}_α ， \underline{R}_β 的函数，写成

$$\Delta^2\rho_{\alpha\beta}^{ij}(t) = (\rho_\beta^i - \rho_\alpha^i) - (\rho_\beta^j - \rho_\alpha^j),$$

而卫星 i 和接收机 α 间的几何距离 ρ_α^i 为

$$\rho_\alpha^i(t) = | \underline{r}^i(t) - \underline{R}_\alpha |;$$

$\Delta^2N_{\alpha\beta}^{ij}$ 是跟踪起始时刻在卫星—接收机几何距离中所包括的载波波长整倍数的二次差：

$$\Delta^2N_{\alpha\beta}^{ij} = (N_\beta^i - N_\alpha^i) - (N_\beta^j - N_\alpha^j).$$

对 (1) 式施行线性化，得到线性观测方程式。方程式中的未知数包括两接收机天线相位中心间相对位置的三维坐标分量，波长整倍数 N_α^i ， N_β^i ， N_α^j ， N_β^j ， $\forall i, j$ 。用最小二乘原理解算这些未知数。

相位二次差之间存在着相关，包括物理相关和数学相关。物理相关主要是由卫星信号传播到两个接收机路径上大气条件影响而引起的，具有空间和时间的特性。数学相关是由对相位直接观测求差而产生的。假设在 t 时刻两台接收机同时跟踪 $(m+1)$ 颗卫星，则可构成 m 个独立的相位二次差。如果相位观测的方差为 σ^2 ，这 m 个二次差都以某一颗卫星为参考卫星，那么它们的方差-协方差矩阵可写为^[2]：

$$\Sigma = \sigma^2 \begin{pmatrix} 4 & 2 & \cdots & 2 \\ 2 & 4 & \cdots & 2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 2 & 2 & \cdots & 4 \end{pmatrix}_{m \times m}, \quad (2)$$

权矩阵

$$P = \sigma^2 \Sigma^{-1} = \frac{1}{2(m+1)} \begin{pmatrix} m & -1 & \cdots & -1 \\ -1 & m & \cdots & -1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & -1 & \cdots & m \end{pmatrix}. \quad (3)$$

以上考虑的是数学相关。至于物理相关比较复杂，目前还没有成熟的模型，需要进一步研究。

用 (1) 式进行平差之前，相位观测二次差 $\Delta^2\Phi(t)$ 要加上电离层和对流层延迟改正。对流层延迟一般用测站上测量的气象要素（气温、气压和湿度）采用公式进行改正，目前广泛采用的有 Hopefield 模型和 Saastamoinen 模型，本文研究时采用前者。根据 Hopefield 模型，

对流层延迟改正公式⁽¹⁾为

$$\delta\rho = \frac{K_d}{\sin(E^2 + 6.25)^{\frac{1}{2}}} + \frac{K_w}{\sin(E^2 + 2.25)^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

而

$$\begin{aligned} K_d &= 1.552 \times 10^{-5} (P/T)(h_d - h), \\ K_w &= 7.46512 \times 10^{-2} (e/T^2)(11000 - h), \\ h_d &= 148.72T - 488.3552. \end{aligned}$$

式中 P , T , e 分别是测站上的气压(以mb计), 气温(以K为单位)和水汽的压力(以mb计), h 为测站高程, 以米计, E 是卫星的高度角。

电离层延迟可通过双频观测用色散原理改正。对于单频接收机, 可用卫星播放的电离层模型计算, 或不加考虑。设 $\Delta^2\Phi_1$ 和 $\Delta^2\Phi_2$ 分别是载波 L_1 和 L_2 的相位二次差, 那么它们的组合

$$\begin{aligned} \Delta^2\tilde{\Phi} &= 2.5457\Delta^2\Phi_1 - 1.5457\Delta^2\Phi_2 \\ &= \Delta^2\rho + \lambda_1(2.5457\Delta^2N_1 \\ &\quad - 1.9837\Delta^2N_2) \quad (5) \end{aligned}$$

消除了电离层延迟的影响, 式中 λ_1 是 L_1 的波长, Δ^2N_1 和 Δ^2N_2 分别是用 L_1 和 L_2 测量时波长整倍数的二次差。

2 实验和分析

本实验所用的数据是1986年夏用4台TI-4100接收机(两台RAM型, 两台PROM型)在UNB实验网上所采集的。

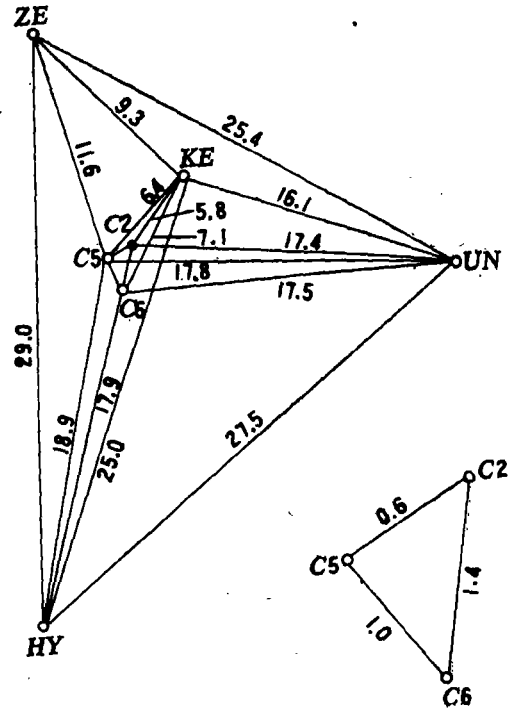


图1 试验网略图(图中长度单位以公里计)

表1 试验网中基线的有效观测时间

基线	UN-ZE	UN-ZE	HY-ZE	UN-HY	UN-HY	ZE-KE	UN-C2	UN-C2
测量日期	7月15日	7月19日	7月17日	7月18日	7月17日	7月15日	7月14日	7月12日
观测时间 (周期数)	391	473	387	321	395	233	264	350
基线	UN-C5	UN-C6	UN-KE	C2-C5	C2-C6	KE-C6	KE-HY	
测量日期	7月11日	7月13日	7月21日	7月12日	7月13日	7月21日	7月18日	
观测时间 (周期数)	483	568	245	162	272	183	212	

注: 周期间隔30秒。

实验网（图 1）的边长由 0.6km 到 30km 不等，每条基线观测的时间列于表 1。观测期间的可见卫星和 GDOP 值如图 2。

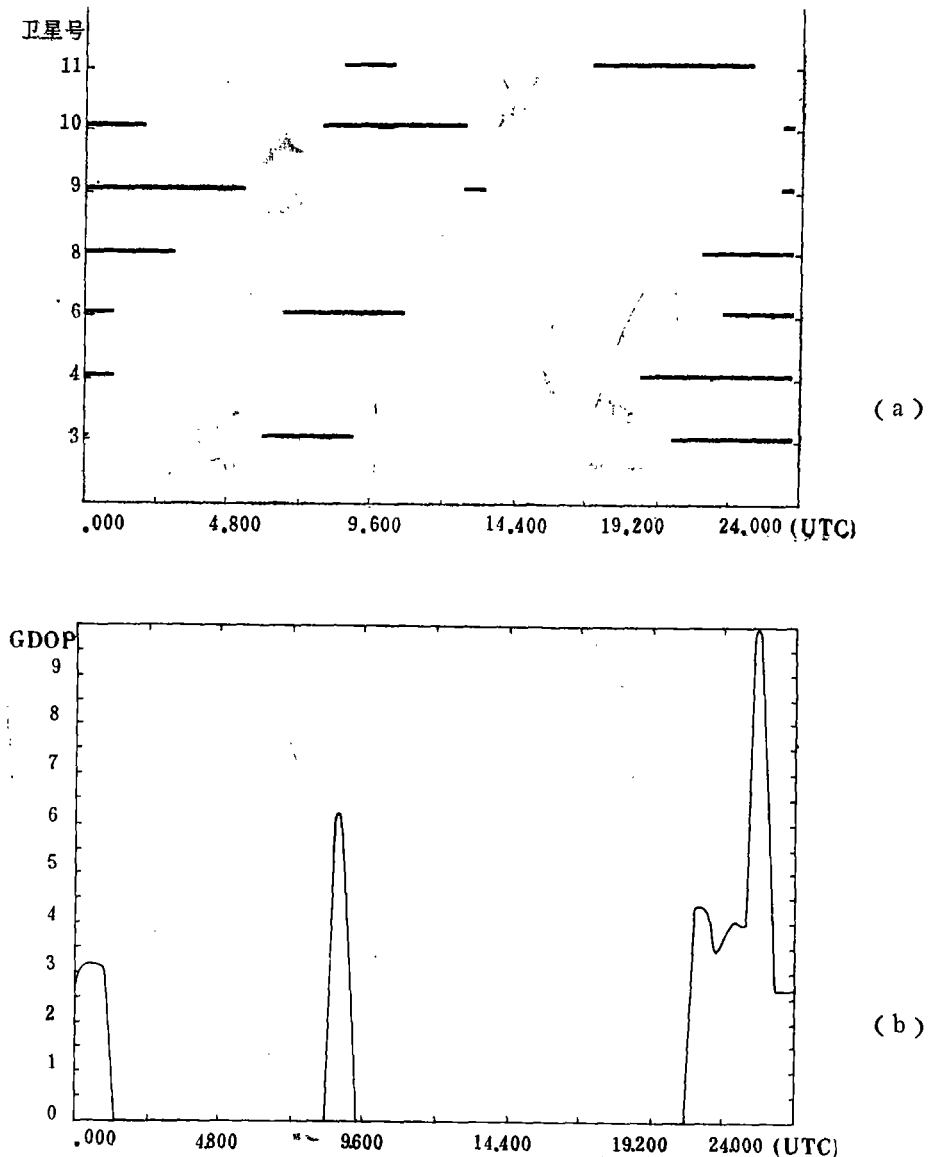


图 2 (a) 观测期间的可见卫星；(b) GDOP 值

2.1 相位观测二次差的精度

用每条基线平差后所得的残差计算相位观测二次差的标准差，结果如图 3 所示。从图中可以看出，标准差 (σ) 与基线长度 (D) 有关，用直线模拟得到

$$\sigma = 3.3\text{mm} + 0.76\text{ppm} \cdot D.$$

目前一些商品化的 GPS 处理软件中，都把相位二次差作为等精度进行网的整体平差，从

本文的试验结果来看，这种做法欠妥。

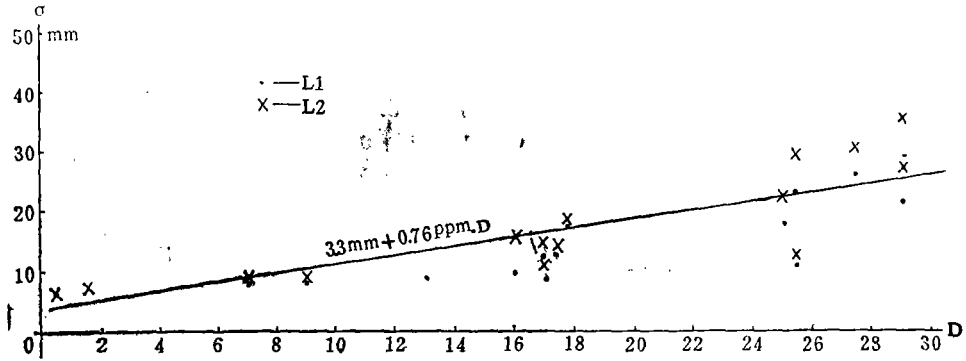


图3 相位二次差的标准差与基线长度的关系

2.2 考虑相位观测二次差之间的数学相关问题

为了研究引进相位二次差间的数学相关对成果的影响，我们对所有的观测资料进行两次处理，一次是不考虑相位差间的相关，另一次是考虑了相关，其方差-协方差矩阵按式(2)的方法构成。表2列出了用载波 L_1 相位观测值进行两次计算所得结果的差值，表3中的模型II-1和模型II-2分别是考虑和不考虑相关时基线或闭合环的闭合差。从表中可以看出：

1. 不考虑相关时，后验方差因子减少的占基线总数的77%，平均减少了14%；
2. 差值小于2倍相应基线分量标准差的占55%，大于2倍的占45%。总的说来差值是显著的；

表2 考虑与不考虑数学相关时所得结果的差值

基线	长度 (km)	纬度方向 (mm)	经度方向 (mm)	高程方向 (mm)	长度差 (mm)	后验方差 因子变化
UN-KE	16.1	-29 (7)	22 (6)	16 (3)	-32 (8)	15%
KE-C6	7.1	11 (10)	-14 (10)	-4 (4)	5 (6)	16%
UN-ZE	25.4	-1	6	5	6	31%
HY-ZE	29.1	8	-9	5	7	10%
UN-C2	17.4	-3 (2)	2 (3)	-2 (2)	-2 (3)	32%
ZE-KE	9.3	-1 (3)	7 (9)	5 (4)	7 (9)	19%
UN-C5	17.8	2 (2)	-12 (3)	-10 (2)	12 (4)	39%
UN-ZE	25.4	-2 (4)	-4 (5)	-6 (3)	3 (6)	15%
HY-UN	27.5	6 (6)	-9 (7)	-1 (4)	3 (2)	21%
UN-C2	17.4	34 (13)	-21 (7)	-7 (6)	24 (8)	1%
C2-C5	0.6	2 (3)	-53 (17)	-17 (7)	36 (11)	-5%
C6-C2	1.4	35 (7)	18 (4)	9 (4)	33 (6)	-8%
UN-C6	17.4	26 (2)	-43 (3)	-19 (2)	42 (3)	-8%

注：表内的差值是考虑了相关的结果减去不考虑相关的结果，括号内的数字是基线分量的标准差。

3. 考虑了相关后, 闭合差减小的占37%, 增加的占63%。但平均来讲, 相对闭合差很接近, 没有明显的区别。

从以上的统计数字还难于对考虑数学相关能否改善结果的精度得出明确的结论, 这个问题需要进一步实验。相位观测二次差之间存在着物理相关和数学相关, 而物理相关是主要的, 然而在数据处理时未能考虑主要的相关因素, 因此只顾及数学相关能改善精度是值得怀疑的。

2.3 对流层延迟的模拟

试验时用 Hopefield 公式模拟对流层延迟的影响, 考虑了3种不同的模型: 模型 I 利用测站上气温、气压和相对湿度3个气象要素的观测值; 模型 II-1 取基线两端所测气象要素的平均值; 模型 III 取测量时间(7月11日~7月21日, 都在晚上)测区气象要素观测值的平均值作为测区平均高程面的气象要素。以上3个模型计算时都考虑了相位二次差之间的数学相关, 而模型 II-2 不考虑相关, 但对流层延迟的模拟方法同模型 II-1。用载波 L_1 和 L_2 计算, 其结果的平均值列于表3中。比较 I, II-1 和 III 三个模型后, 可以得出:

1. 模型 III 最好, 其次是 II-1;

2. 3个模型的差别是显著的, 特别是在高程方向上, 模型 III, II-1 的闭合差都比 I 有明显减少。这些结果说明了直接利用每个测站上测量的气象要素改正对流层延迟效果并不理想。原因在于, 测站上所测量的气象要素受测点附近的地形影响较大, 有局部性, 它们不能有效地表示信号传播路径上对流层大气的状态。另一方面也说明了, 对流层延迟的模拟对高程分量的影响较水平分量。为了提高高差的测定精度, 需要更准确地测定或模拟近地面范围内(例如几百米)的大气状态。

表3 基线或闭合环的闭合差比较 (不同对流层模拟模型)

基线或 闭合环	纬度方向 (mm)				经度方向 (mm)				高程方向 (mm)				矢量闭合差长度 (mm)			
	I	II-1	II-2	III	I	II-1	II-2	III	I	II-1	II-2	III	I	II-1	II-2	III
UN-ZE	9	2	1	0	4	2	3	4	60	25	24	26	61	25	24	26
UN-C2	90	65	33	6	55	58	35	2	128	63	61	20	166	108	78	21
HY-UN	68	96	164	70	94	56	174	88	286	182	181	168	309	213	300	213
UN-ZE-HY	56	68	129	46	108	41	151	76	259	130	138	119	286	152	242	149
UN-C2-C5	62	59	52	14	226	45	4	4	51	44	34	14	240	86	62	20
UN-C6-C2	96	52	6	0	81	41	18	0	21	36	14	6	127	75	24	6
ZE-UN-KE	133	98	192	52	162	122	114	64	160	16	27	38	264	157	225	91
UN-C6-KE	32	84	49	80	200	100	50	96	6	4	20	1	203	131	73	125
平均相对闭合差(ppm)	2.1	1.9	2.0	0.9	3.1	1.7	1.8	1.0	3.6	1.9	1.9	1.4	5.9	3.4	3.5	2.2

注: 在计算闭合环闭合差时, 基线 UN-ZE 是用 7 月 15 日的观测值, UN-C2 用 7 月 12 日的, HY-UN 用 7 月 18 日的。

2.4 电离层延迟改正

对电离层延迟的影响采用两种处理方法，一种是不考虑，认为它对相对定位的影响很小；另一种是用双频相位观测，由(5)式计算混合相位观测值，以消除电离层延迟的影响。计算结果列于表4。表中 L_1 栏是用单频计算结果， L_1/L_2 栏是用双频改正电离层延迟影响后计算的结果。比较两栏的结果可以看出，进行电离层延迟改正使结果恶化，水平分量的误差平均约增大一倍，高程方面增大30%。验后方差因子平均也增大了2.2倍。这说明用双频观测进行电离延迟改正后相位的偶然误差变大。因此，对于几十公里范围内的基线，可不必进行电离层延迟改正。

表4 基线或闭合环的闭合差比较 (电离层改正和约束“整波长数”)

基线 与 闭合环	纬度方向 (mm)			经度方向 (mm)			高程方向 (mm)			矢量闭合长度 (mm)		
	L_1	L_1/L_2	L_1 (固)	L_1	L_1/L_2	L_1 (固)	L_1	L_1/L_2	L_1 (固)	L_1	L_1/L_2	L_1 (固)
UN-ZE	4	16	14	12	38	17	29	41	5	32	58	23
UN-C2	10	22	6	7	25	9	16	1	16	20	33	19
HY-UN	69	68	8	90	99	2	171	178	120	205	215	120
UN-ZE-HY	55	83	7	93	144	8	125	142	66	165	219	67
UN-C2-C5	4	26	0	38	166	3	10	83	19	39	187	19
UN-C6-C2	7	31	0	12	49	3	2	8	19	14	58	19
ZE-UN-KE	90	208	11	103	223	0	20	14	31	138	305	33
UN-C6-KE	111	208	6	114	168	3	6	27	26	159	269	27
平均相对闭合差(ppm)	1.1	2.0	0.2	1.4	2.8	0.2	1.3	1.7	1.1	2.5	4.3	1.2

2.5 未知的“整波长数” N 的约束解

利用(1)式进行平差时，除了解算基线矢量的三个分量外，还要求出卫星—接收机间距离的“整波长数” N 。由于各种误差的影响，所求的 N 值不可能是整数。但当基线不长(例如20—30km)，卫星几何图形好，观测质量高时，所估计的 N 值将接近于整数。如果把它们凑成整数并作为已知值，从观测值中减去再重新解算基线，则可望提高解的精度。为了研究这个问题，采用对流层延迟改正模型Ⅲ，用 L_1 相位观测值进行计算，把约束 N 值的计算结果和原来的结果比较，差值列于表5。所计算的基线或闭合环的闭合差列在表4中的 L_1 (固)栏内。从两个表中可以看出：

1. 两个解之间的差值(表5)是显著的，基线分量差值的平均相对误差为2.5ppm；
2. 和不约束 N 值相比，高程方向闭合差减少不多，而水平分量的闭合差却明显变小，平均由1.3ppm减少为0.2ppm。如果用基线矢量闭合差长度的相对误差来衡量，平均由2.5ppm下降到1.2ppm，精度改善是显著的。

由以上分析可以得出结论：当解算的“整波长数”接近于整数时，应该把它们凑成整数，并作为已知值再重新解算基线，以提高解的精度。凑成整数的好坏程度可以用后验方差

因子来衡量,如果凑整后,后验方差因子没有明显增大,那么凑整是有效的。

表 5 约束和不约束“整波长数”结果的差值

基 线	长 度 (km)	纬度方向 (mm)	经度方向 (mm)	高程方向 (mm)	长 度 差 (mm)	3个分量相 对差值的平 均值(ppm)
UN-KE	16.1	68	-62	-21	85	3.1
KE-C6	7.1	-25	33	13	-11	3.3
KE-HY	25.0	1	-106	14	-25	1.6
UN-ZE	25.4	-14	32	31	36	1.0
HY-UN	27.5	26	-29	-7	-5	0.8
HY-ZE	29.1	-8	23	21	-9	0.6
UN-C2	17.4	-1	3	-15	-4	0.4
ZE-KE	9.3	-24	73	23	75	4.3
UN-C5	17.8	-18	38	8	-39	1.2
UN-ZE	25.4	24	-38	-6	45	0.9
HY-UN	27.5	35	-63	-44	25	1.7
UN-C2	17.4	15	2	-15	-1	0.6
C2-C5	0.6	-14	-6	-7	15	15.0
C6-C2	1.4	-2	4	-4	2	2.4
UN-C6	17.5	-11	16	-2	-16	0.6

3 几点结论

通过试验研究可以得出如下几点初步结论:

1. 载波相位二次差的误差与构成二次差的两台接收机间的距离有关。对GPS观测数据进行处理时,如果采用解算基线的方法,那么取所有的相位二次差等权是合理的;然而,如果采用网的整体平差方法,定权时需要考虑接收机间的距离。

2. 考虑相位二次差之间的数学相关是否能改善基线解的精度还需要进一步实验。

3. 如果基线边长不太长,不需要进行电离层延迟的改正。用双频法改正反而会增大误差,降低基线的解算精度。

4. 正确地模拟对流层延迟的影响,对提高基线的测定精度是很重要的,尤其是高程分量更是如此。对于不太长的基线,取测区气象要素的平均值来模拟,比直接利用每个接收机处气象要素的观测值来改正效果更好。

5. 当解算的“整波长数”接近于整数时,应当把它们当成整数并作为已知值重新解算基线,这样可以提高解的精度。

参 考 文 献

[1] 陈永奇,李裕忠,杨仁.海洋测量概论.武汉测绘科技大学教材科,1984,

- [2] Remondi B W. Using the Global Positioning System (GPS) Phase Observable for Relative Geodesy: Modelling, Processing and Results. Ph.D Dissertation, University of Texas at Austin, 1984.
- [3] Vanicek P, et al. DIPOP Differential Positioning Program Package for the Global Positioning System. TR. 115, Dept. of Surveying Engineering, University of New Brunswick, 1985.

Experimental Study on GPS Data Processing Technique

Chen Yongqi A. Chrzanowski

Abstract

The exploitation of GPS differential technology for engineering surveys differs in a number of respects from more conventional geodetic and cadastral applications. Among the principal considerations are the greater accuracy and reliability requirements. To satisfy these demands further improvement of existing data processing methods becomes necessary, which leads to this investigation. In this study different models are utilized to process GPS carrier phase observations, which were acquired from a test network with interstation distances ranging from 0.6km to 30km using GPS receiver TI-4100. The experiments show:

— the standard deviation of double difference of phase observations is dependent of the baseline length,

— introduction of the mathematical correlations among the double differences may not improve the results,

— the dual frequency correction for the ionospheric effect gives worse results than not applying the correction at all,

— careful modelling of tropospheric delay is of much importance for accurate baseline determination, especially for height component,

— the solution will be greatly strengthened if the estimated ambiguities are properly forced to integers.

[Key words] GPS, data processing; experimental study