

GPS 伪距差分定位技术的试验研究

兰孝奇¹, 张兵良¹, 黄继红², 黄晓时¹

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京市国土资源信息中心, 江苏 南京 210008)

摘要: 讨论了 GPS 伪距差分定位的原理及其数学模型, 为了研究伪距差分定位精度, 编写了 GPS 伪距差分定位软件, 并对某 GPS 网的观测数据进行了大量的伪距差分定位试验计算. 计算结果表明, GPS 三类伪距观测值的差分定位精度基本相同, 在距基准站 50 km 范围内, 观测 10 ~ 60 s 时间的伪距差分定位精度可以达到 0.2 ~ 0.4 m. 伪距差分定位技术在海上定位和 GIS 数据采集等领域有广泛应用前景.

关键词: 全球定位系统; 伪距差分定位; 定位精度

中图分类号: P228.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-198X(2004)03-0300-04

GPS 卫星定位技术具有速度快、精度高、自动化程度高、经费省以及不受通视条件限制等优点, 已经在测绘工程中得到了广泛应用. GPS 伪距差分定位是 GPS 定位方法之一, 该项定位技术主要应用于对定位精度要求不是很高、相对定位距离长、要求实时定位或快速定位的测量领域, 例如海上定位、GIS 数据采集等. GPS 局域差分定位和广域差分定位均采用了该项技术.

1 GPS 伪距差分定位的原理和数学模型

GPS 伪距差分定位系统由一台基准站 GPS 接收机和一台或多台流动站 GPS 接收机组成, 基准站 GPS 接收机安置在已知坐标点上. 基准站 GPS 接收机和流动站 GPS 接收机同时接收来自相同 GPS 卫星的导航定位信号, 基准站 GPS 测得的伪距与该点到卫星的已知距离进行比较, 便可获得 GPS 伪距观测值的改正值. 如果及时将 GPS 伪距改正值发送(数据链)给若干台共视卫星的流动站 GPS 接收机, 流动站 GPS 接收机经改正后测得的实时位置, 便称为实时伪距差分动态定位. 如果没有数据链, 可以将基准站和流动站的 GPS 接收机接收的伪距观测值下载到计算机中, 通过伪距差分定位软件进行伪距差分定位, 该方法称为事后伪距差分定位^[1].

设基准站 R 测得至 GPS 卫星 J 的伪距为

$$\rho_r^j = \rho_r^j + c(d\tau_r - d\tau_s^j) + d\rho_r^j + \delta\rho_{1r}^j + \delta\rho_{2r}^j \quad (1)$$

$$\rho_r^j = \sqrt{(X_r - X_j)^2 + (Y_r - Y_j)^2 + (Z_r - Z_j)^2}$$

式中: ρ_r^j ——基准站 R 至第 J 颗卫星之间的真实距离; X_r, Y_r, Z_r ——基准站 R 的三维已知坐标; X_j, Y_j, Z_j ——卫星 J 发射信号时刻的三维坐标; $d\rho_r^j$ ——GPS 卫星星历误差所引起的距离偏差; $d\tau_r$ ——接收机时钟相对于 GPS 时间系统的偏差; $d\tau_s^j$ —— J 颗卫星时钟相对于 GPS 时间系统的偏差; $\delta\rho_{1r}^j$ ——电离层时延所引起的距离偏差; $\delta\rho_{2r}^j$ ——对流层时延所引起的距离偏差; c ——电磁波的传播速度.

根据基准站的已知坐标和 GPS 卫星星历, 可以精确算得真实距离 ρ_r^j , 而伪距 ρ_r^j 是基准站接收机测得的, 则伪距的改正值

$$\Delta\rho_r^j = \rho_r^j - \rho_r^j = -c(d\tau_r - d\tau_s^j) - d\rho_r^j - \delta\rho_{1r}^j - \delta\rho_{2r}^j \quad (2)$$

在基准接收机进行伪距测量的同时, 流动站接收机 K 也对第 J 颗卫星进行了伪距测量, 流动站接收机所测得的伪距

$$\rho_k^j = \rho_k^j + c(d\tau_k - d\tau_s^j) + d\rho_k^j + \delta\rho_{1k}^j + \delta\rho_{2k}^j \quad (3)$$

将基准站所测得的伪距改正值带入(3)式(即(2)(3)两式相加)得

$$\rho_k^j + \Delta\rho_r^j = \rho_k^j + \alpha(d\tau_k - d\tau_r) + (d\rho_k^j - d\rho_r^j) + (\delta\rho_{1k}^j - \delta\rho_{1r}^j) + (\delta\rho_{2k}^j - \delta\rho_{1r}^j) \quad (4)$$

当流动站与基准站相距在一定距离范围之内时,可近似地认为

$$d\rho_k^j \approx d\rho_r^j \quad \delta\rho_{1k}^j \approx \delta\rho_{1r}^j \quad \delta\rho_{2k}^j \approx \delta\rho_{1r}^j \quad (5)$$

$$\Delta\rho_\tau = \alpha(d\tau_k - d\tau_r)$$

则式(4)变为

$$\rho_k^j + \Delta\rho_r^j = \rho_k^j + \Delta\rho_\tau \quad (6)$$

式(6)中共有 4 个未知数,它们分别是流动站 K 的三维坐标(X_k, Y_k, Z_k)和 GPS 接收机钟差引起的改正项 $\Delta\rho_\tau$. 如果基准站和流动站某历元共视 4 颗以上卫星,就可以根据式(6)建立误差方程式

$$V_j = \frac{(X_k^0 - X_j)}{D_0} \delta X_k + \frac{(Y_k^0 - Y_j)}{D_0} \delta Y_k + \frac{(Z_k^0 - Z_j)}{D_0} \delta Z_k + \Delta\rho_\tau + (D_0 - \rho_k^j - \Delta\rho_r^j) \quad (7)$$

$$D_0 = \sqrt{(X_k^0 - X_j)^2 + (Y_k^0 - Y_j)^2 + (Z_k^0 - Z_j)^2} \quad (j = 1, 2, \dots, n; n \geq 4)$$

式中: X_k^0, Y_k^0, Z_k^0 ——流动站 K 的三维近似坐标.按最小二乘法求解流动站该历元的三维坐标

$$X_k = X_k^0 + \delta X_k \quad Y_k = Y_k^0 + \delta Y_k \quad Z_k = Z_k^0 + \delta Z_k$$

和三维坐标中误差 M_{Xk}, M_{Yk}, M_{Zk} .

若流动站在某一测点 P 共观测了 N 个历元,则可以得到 P 点 N 个三维坐标结果(X_i, Y_i, Z_i), $i = 1, 2, \dots, N$,取它们的算术平均值作为 P 点定位结果:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N X_i / N \quad \bar{Y} = \sum_{i=1}^N Y_i / N \quad \bar{Z} = \sum_{i=1}^N Z_i / N \quad (8)$$

若令

$$V_{Xi} = \bar{X} - X_i \quad V_{Yi} = \bar{Y} - Y_i \quad V_{Zi} = \bar{Z} - Z_i$$

则可以根据下式计算一个历元的 P 点三维坐标的中误差

$$M_X = \sqrt{\sum_{i=1}^N V_{Xi}^2 / (N-1)} \quad M_Y = \sqrt{\sum_{i=1}^N V_{Yi}^2 / (N-1)} \quad M_Z = \sqrt{\sum_{i=1}^N V_{Zi}^2 / (N-1)} \quad (9)$$

N 个历元的 P 点三维坐标算数平均值的中误差

$$M_{\bar{X}} = \frac{M_X}{\sqrt{N}} \quad M_{\bar{Y}} = \frac{M_Y}{\sqrt{N}} \quad M_{\bar{Z}} = \frac{M_Z}{\sqrt{N}} \quad (10)$$

若又已知流动站 P 点的三维坐标真值为($\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$),并令

$$\Delta X_i = X_i - \bar{X} \quad \Delta Y_i = Y_i - \bar{Y} \quad \Delta Z_i = Z_i - \bar{Z}$$

则 P 点三维坐标的中误差为

$$M_X = \sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta X_i^2 / N} \quad M_Y = \sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta Y_i^2 / N} \quad M_Z = \sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta Z_i^2 / N} \quad (11)$$

2 试验及计算结果分析

本次试验的内容是事后伪距差分定位,试验的观测数据取自某 GPS 静态观测网,共有 4 个 GPS 点,观测日期是 2003 年 1 月 26 日,观测时段为 24 h,观测仪器为 Ashtech-ZX GPS 双频接收机.为进行伪距差分计算结果的比较,首先使用美国麻省理工学院(MIT)研制开发的精密 GPS 定位定轨软件 GAMIT 解算了该 4 个 GPS 点的坐标,解算过程中加入了 IGS 核心站点上海佘山站(SHAO)的观测数据,并固定其三维坐标作为固定起算基准,这样就得到了该 4 个 GPS 点精确的 WGS-84 三维坐标,其三维坐标中误差均小于 1 cm,因而可以将其视为真值来评定 GPS 伪距差分定位的精度.

为了进行 GPS 伪距差分定位技术的应用研究,笔者使用 VB 计算机语言编制了 GPS 伪距差分定位软件.为了研究伪距差分定位的精度,选取一个 GPS 点(点名为 SHCH)作为基准站,其它 3 个 GPS 点(SHJD, SHJS, SHXZ)作为流动站,在 2003 年 1 月 26 日的 24 h 的观测数据中选取了 600 个历元的观测数据,由于 GPS 双频接收机可以接收 3 种伪距观测值,它们分别是 C/A 码伪距、L1 上的 P 码伪距和 L2 上的 P 码伪距,笔者对这 3 类伪距 600 个历元的观测值分别进行了伪距差分定位计算.

表1 3类伪距单历元差分定位的综合精度

Table 1 Precision of differential position of three pseudo-ranges with one epoch observation

m

点名	中误差 或差值	C/A 码伪距定位			P1 码伪距定位			P2 码伪距定位		
		最大值	平均值	用真值计算	最大值	平均值	用真值计算	最大值	平均值	用真值计算
SHJD (距基 准站 22 km)	M_X	1.37	0.25	0.28	1.38	0.21	0.28	2.00	0.30	0.38
	M_Y	1.66	0.32	0.38	1.83	0.29	0.41	2.12	0.41	0.52
	M_Z	1.59	0.25	0.32	1.13	0.21	0.36	1.67	0.30	0.53
	Δ_X	1.47	0.22		1.94	0.21		1.78	0.30	
	Δ_Y	1.55	0.29		1.74	0.29		2.26	0.38	
	Δ_Z	1.17	0.24		2.11	0.24		2.11	0.37	
SHJS (距基 准站 44 km)	M_X	1.90	0.32	0.39	1.68	0.29	0.55	2.22	0.43	0.70
	M_Y	2.10	0.42	0.50	2.20	0.38	0.48	2.52	0.57	0.71
	M_Z	1.52	0.30	0.62	1.34	0.27	0.64	2.13	0.40	1.01
	Δ_X	2.01	0.27		2.15	0.31		2.32	0.41	
	Δ_Y	1.61	0.38		2.02	0.36		2.12	0.52	
	Δ_Z	1.74	0.47		1.98	0.48		1.98	0.77	
SHZX (距基 准站 14 km)	M_X	1.20	0.23	0.28	1.21	0.20	0.28	1.88	0.26	0.33
	M_Y	1.53	0.30	0.31	1.44	0.26	0.32	1.76	0.32	0.44
	M_Z	0.91	0.23	0.45	1.02	0.20	0.52	1.99	0.25	0.42
	Δ_X	1.38	0.19		1.89	0.18		2.01	0.22	
	Δ_Y	1.37	0.30		1.71	0.24		2.21	0.31	
	Δ_Z	1.50	0.22		1.77	0.22		1.78	0.32	

表2 C/A 码伪距多历元差分定位的平均值的综合精度

Table 2 Precision of multi-epoch differential position mean value of C/A code pseudo-range

m

点名	中误差 或差值	10个历元(共60个)			30个历元(共20个)			60个历元(共10个)		
		用平均值		用真值 计算	用平均值		用真值 计算	用平均值		用真值 计算
		最大值	平均值		最大值	平均值		最大值	平均值	
SHJD (距基 准站 22 km)	M_X	0.24	0.06	0.20	0.08	0.04	0.18	0.05	0.02	0.16
	M_Y	0.27	0.09	0.21	0.11	0.06	0.12	0.06	0.03	0.09
	M_Z	0.26	0.07	0.22	0.10	0.05	0.18	0.05	0.02	0.16
	Δ_X	0.47	0.16		0.36	0.14		0.27	0.00	
	Δ_Y	0.80	0.16		0.21	0.10		0.15	0.00	
	Δ_Z	0.51	0.17		0.49	0.13		0.32	0.03	
SHJS (距基 准站 44 km)	M_X	0.21	0.05	0.34	0.10	0.04	0.29	0.07	0.03	0.28
	M_Y	0.26	0.09	0.39	0.12	0.07	0.32	0.08	0.05	0.31
	M_Z	0.31	0.08	0.54	0.19	0.06	0.47	0.11	0.05	0.40
	Δ_X	1.50	0.24		0.84	0.22		0.73	0.22	
	Δ_Y	1.32	0.31		0.63	0.28		0.50	0.28	
	Δ_Z	1.44	0.41		1.11	0.34		0.84	0.30	
SHZX (距基 准站 14 km)	M_X	0.15	0.05	0.18	0.07	0.04	0.13	0.04	0.03	0.11
	M_Y	0.23	0.09	0.27	0.10	0.06	0.21	0.06	0.05	0.16
	M_Z	0.15	0.06	0.21	0.09	0.00	0.15	0.05	0.03	0.09
	Δ_X	0.63	0.13		0.32	0.10		0.34	0.08	
	Δ_Y	0.80	0.20		0.62	0.15		0.34	0.12	
	Δ_Z	0.67	0.16		0.35	0.12		0.15	0.09	

从表1、2可以发现(a)3类伪距观测值的定位精度基本相同,所以表2仅列出了C/A伪距的定位结果。(b)某些历元的定位精度很低,最大达2m多。分析其原因,这主要是GPS定位系统固有的缺陷造成的,某地方的某一时刻GPS的定位精度与GPS卫星在空中的几何分布有关,对于某一地方在一天中总有某些时段的GPS定位结果的精度很差,因此在实际观测中必须尽量避开这些时段。为了考察伪距差分定位的全天候的精度情况,多历元伪距差分定位结果也包含了星历很差时刻的定位结果,若去掉这些结果,平均的定位精度至少可以提高一倍以上。(c)GPS伪距差分定位精度随着流动站距基准站的距离增加而降低。(d)多历元观测

取平均是提高伪距差分定位精度的有效方法,但随着历元次数的逐渐增加,精度提高很有限.从这次的试验结果来看,如果按 1 s 历元间隔接收观测数据,那么距基准站 15 km 之内只要观测 10 ~ 30 s 的时间,三维坐标的定位精度就可以达到 0.2 m 左右,距基准站 25 km,观测 20 ~ 40 s,三维坐标的定位精度也可以达到 0.2 m 左右,距基准站 45 km 要观测 40 ~ 60 s,三维坐标的定位精度可以达到 0.4 m 左右.如果选取较好的观测时段,这个定位精度还会有相应的提高.(e)单历元伪距差分定位的平差计算精度和利用多历元定位算数平均值计算的定位精度比实际定位精度要高,特别是当历元次数的不断增加,其定位精度指标已无法代表实际定位的精度,这个问题在实际应用中应得到重视和注意.

3 结 论

- a. 三类伪距观测值的定位精度基本相同;
- b. 卫星的几何分布强度和可接收信号的卫星数决定了 GPS 的观测精度,尽量选择恰当的观测窗口;
- c. 在距基准站 50 km 范围内,观测 10 ~ 60 s,伪距差分定位的精度可以达到 0.2 ~ 0.4 m.

参考文献:

- [1] 徐绍铨,张华海,杨志强,等. GPS 测量原理及应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,2001. 185—187.

Experimental research of GPS pseudo-range differential position

LAN Xiao-qi¹, ZHANG Bing-liang¹, HUANG Ji-hong², HUANG Xiao-shi¹

(1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. Nanjing Land Resources Information Center, Nanjing 210008, China)

Abstract: The theory and mathematical model for GPS pseudo-range differential position are discussed, and related software is compiled for research on the precision of pseudo-range differential position. A great deal of calculation based on the observed data from a GPS network shows that the precision of differential position is almost the same for three kinds of pseudo-range observed data, and that within a range of 50 km away from the base station, the precision of pseudo-range differential position for the observation time lasting 10 ~ 60 seconds can reach 0.2 ~ 0.4 m. The technique can be widely applied to marine position and GIS data acquisition.

Key words: GPS; pseudo-range differential position; position precision