

文章编号:1001-1595(2007)03-0251-05

中图分类号:P228.42

文献标识码:A

基于精密单点定位技术的GPS辅助空中三角测量

袁修孝¹, 付建红¹, 楼益栋²

(1. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079; 2. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079)

GPS-supported Aerotriangulation Based on GPS Precise Point Positioning

YUAN Xiu-xiao¹, FU Jian-hong¹, LOU Yi-dong²

(1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430049, China; 2. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430049, China)

Abstract: This paper describes briefly the basic principle of GPS Precise Point Positioning (PPP) and analyzes the accuracy of 3D coordinates of the exposure station positions obtained by PPP. A great deal of actual aerial photographs, at image scales from 1:2 500 to 1:60 000, with PPP data taken from multi-type topography in China were processed by our GPS-supported bundle block adjustment program WuCAPS. The empirical results have verified that the errors are very distinct in the 3D coordinates of the exposure station positions determined by PPP. However, when there are 4 XYZ ground control points around the corners of a block area, the accuracy of GPS-supported bundle block adjustment with GPS data by PPP method is closed to that by DGPS method. And the accuracy satisfies the topographic maps specifications for aerophotogrammetric office operation.

Key words: GPS precise point positioning; GPS-supported bundle block adjustment; accuracy

摘要: 简要介绍GPS精密单点定位的基本原理,通过对带双频动态GPS数据的1:2 500~1:60 000各种摄影比例尺的覆盖多种地形航摄资料的处理,比较了GPS精密单点定位与差分GPS定位所获取摄站坐标的差异,并分析利用两种摄站坐标分别进行GPS辅助光束法区域网平差的精度。试验表明,当区域四角布设四个平高地面控制点时,两者的加密精度是基本一致的,且采用GPS精密单点定位技术进行GPS辅助空中三角测量结果能够满足我国现行航空摄影测量规范的精度要求。

关键词: GPS精密单点定位;GPS辅助光束法区域网平差;精度

1 引言

GPS辅助空中三角测量从20世纪70年代开始研究,至今已有近30年的发展历程,由于其可大量减少地面控制点、缩短航测成图周期、降低生产成本,已被广泛用于大区域、中小比例尺、困难地区的航空摄影测量地形测图中,产生了明显的社会效益^[1]。然而,为了得到满足航空摄影测量要求的GPS摄站坐标,航空摄影时,必须在地面架设1~2个GPS基准站,并要求飞机起飞前进行适当的初始化,航摄过程中尽量保证GPS信号不失锁,且飞机着陆后最好能进行一段

时间的静态观测。这种作业模式不但提高了生产成本,而且增加了航空摄影的作业难度,使其应用受到了一定的制约。

随着GPS技术的发展,全球连续运行跟踪站日益增多,IGS可提供精度优于5cm的精密星历,卫星钟差改正数可达到0.1~0.2ns,GPS接收机的性能也不断改善,大气延迟模型愈来愈精确,削弱对流层和电离层延迟误差的方法亦不断完善,非差分单机实现高精度定位成为可能。Zumberge等提出了利用GPS精密星历、卫星钟差和双频载波相位观测量,采用非差分模式进行精密单点定位的方法,并且在处理单机静态观测

收稿日期:2006-11-15;修回日期:2006-12-27

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-04-0662);教育部长江学者和创新团队发展计划—创新团队项目(I RT0438)

作者简介:袁修孝(1963),男,博士,武汉大学珞珈特聘教授,博士生导师。主要从事航空航天遥感高精度对地目标定位理论与方法、高分辨率卫星遥感影像几何处理、影像变化检测与数据更新等的研究与教学工作。E-mail:yxxqxhyw@public.wh.hb.cn

数据时取得了cm级的定位结果^[2,3]。随后,JPL的Muellerschoen等提出了利用非差分双频载波相位观测值、在初始化后进行单历元精密单点定位方法,以实现全球范围内的实时动态定位^[4,5]。目前,该方法用于动态航空测量已达到cm级的精度^[6]。

GPS精密单点定位的实质是采用一台GPS接收机来独立确定其接收天线相位中心在ITRF框架中的绝对位置。如果将其用于GPS辅助空中三角测量,只需在飞机上安装一台与航摄仪相连的GPS接收机,航空摄影完全可以按照常规方法作业,这样GPS辅助航空摄影的技术规程将大为简化。为此,本文从介绍GPS精密单点定位的基本原理出发,通过处理1 2500~1 60 000各种摄影比例尺的覆盖多种地形的航摄资料,分析了利用GPS精密单点定位和差分定位获取的摄站坐标进行GPS辅助光束法区域网平差所能达到的精度,并对两者的结果进行了比较。希望对该技术在我国无图区、西部困难地区基础测绘中的应用有所裨益。

2 GPS精密单点定位

2.1 基本原理

GPS精密单点定位目前是采用单台双频GPS接收机,利用IGS提供的精密星历和卫星钟差,基于载波相位观测值进行高精度定位。观测值中的电离层延迟误差通过双频信号组合消除、对流层延迟误差通过引入未知参数进行估计。其观测方程如下^[7]:

$$l_p = \rho + c(dt_r - dT^i) + M \cdot z + \sigma_p \quad (1)$$

$$l = \rho + c(dt_r - dT^i) + a^i + M \cdot z + \sigma_l \quad (2)$$

式中, l_p 为无电离层伪距组合观测值; l 为无电离层相位组合观测值(距离); ρ 为测站(X_r, Y_r, Z_r)与GPS卫星(X^i, Y^i, Z^i)间的几何距离; c 为光速; dt_r 为GPS接收机钟差; dT^i 为GPS卫星 i 的钟差; a^i 为无电离层相位组合观测值(距离)的

模糊度(不具有整数特性); M 为投影函数; z 为天顶方向对流层延迟改正数; σ_p 和 σ_l 分别为两种组合观测值的观测噪声和多路径误差。

将 l_p, l 视为观测值,测站坐标、接收机钟差、无电离层组合模糊度及对流层天顶延迟改正参数视为未知数 X ,在未知数近似值 X^0 的邻域内对式(1)和式(2)展开成一次项,得误差方程矩阵形式为

$$V = Ax - l, \quad P \quad (3)$$

式中, V 为观测值残差向量; A 为设计矩阵; x 为未知数增量向量; l 为常数向量; P 为观测值权矩阵。

式(3)中 A 和 l 的计算用到的GPS卫星钟差和轨道参数需采用IGS事后精密钟差和轨道产品。由于目前IGS提供的精密星历和卫星钟差间隔为15 min或5 min,而航空摄影时机载GPS观测值的采样间隔一般为1 s,有时可达0.1 s,因此,要得到每个历元卫星的精确位置和卫星钟差必须采用内插方法计算。

GPS精密单点定位时,对参数的估计采用序贯最小二乘估计方法^[7]。设待估参数作为带权观测值并设其先验权矩阵为 P^0 ,则由式(3)按最小二乘平差方法可求解未知数为

$$x = (P^0 + A^T P A)^{-1} A^T P l \quad (4)$$

由此可得到被估计参数为

$$X = X^0 + x \quad (5)$$

未知数的协因数阵为

$$Q_{xx} = (P^0 + A^T P A)^{-1} \quad (6)$$

式(4)的求解采用的是一种高效序贯滤波算法,迭代过程中需要考虑相邻观测历元间的参数在状态空间的变化情况,并用合适的随机过程来自适应地更新参数的权矩阵。若用下标 i 表示历元号,在序贯滤波中将上一历元参数的估计值作为当前历元的初始值^[7],即 $X_i^0 = X_{i-1}$ 。

设第 i 历元和第 $i-1$ 历元间隔 t ,那么第 i 历元参数的先验权矩阵为

$$P_i^0 = (Q_{xx} + Q_t)^{-1} \quad (7)$$

$$Q_t = \begin{pmatrix} q(x)_t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q(y)_t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q(z)_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q(dt)_t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q(z)_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q(N^j, (j=1, n))_t \end{pmatrix}$$

式中, $Q_t =$

在没有发生周跳的情况下, 模糊度参数是常数, 故 $q(N^j, (j = 1, n))_t = 0$; 对于 $q(x)_t, q(y)_t, q(z)_t$, 应根据测站的运动情况来确定; 接收机钟差的过程噪声通常视为白噪声, 对流层天顶延迟误差可用随机游走估计^[7]。

2.2 摄站坐标精度分析

为了分析 GPS 精密单点定位的精度, 本文对不同比例尺航空摄影时(详见表1) 所获取的 GPS 观测值利用加拿大 Applarix 公司 POS 系统自带的数据库后处理软件 POSpac^[8] 进行了差分 GPS 定位和武汉大学研制的动态 GPS 精密单点定位软件 TriP^[9] 进行精密单点定位, 得到了每张像片的两套外方位线元素。图1 示意了试验4 所获取

的4 条航线上每个历元在 ITRF 框架中的 3 维坐标的差值变化曲线。

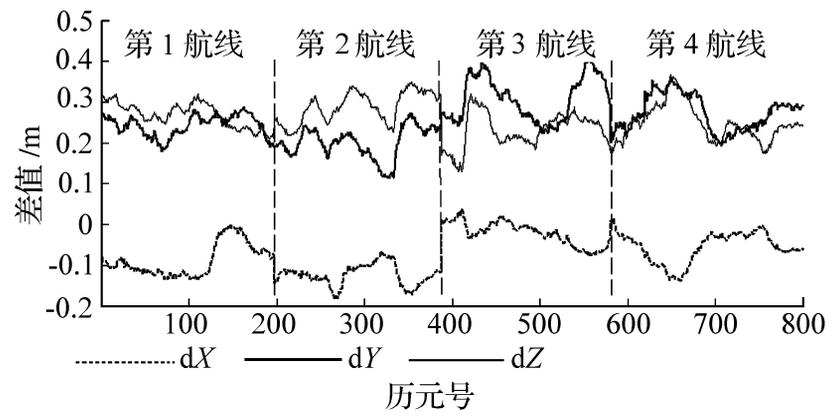


图1 两种定位方法坐标较差图

Fig.1 Coordinate difference between differential GPS positioning and precise point positioning

表1 试验区航摄资料参数

Tab.1 Parameters of images in experimental projects

项 目	试验1	试验2	试验3	试验4
航摄时间	2004-11	2005-01	2005-09	2005-10
航摄飞机	运-12	运-12	运-8	奖状II
航摄仪	Leica RC-30	Leica RC-30	Leica RC-30	Leica RC-30
航摄飞行控制系统	Track Air	Track Air	CCNS-4	CCNS-4
机载定位定向系统	POS AV 510	POS AV 510	POS AV 510	POS AV 510
基准站 GPS 接收机	Astech	Trimble 5700	Trimble 5700	Trimble 5700
航摄胶片	Kodak 2444	Kodak 2044	Kodak 2402	Kodak 2402
航摄仪主距/mm	153.84	303.64	154.06	153.53
像幅/cm ²	23×23	23×23	23×23	23×23
摄影比例尺	1:2500	1:3000	1:32000	1:60000
航向重叠/%	61	63	64	64
旁向重叠/%	32	33	33	30
航线/条	9	10	9	4
构架航线/条	2	2	2	0
像片/张	255	405	244	48
地面控制点/个	72	155	34	29
加密点/个	3632	6538	2957	712
区域范围/km ²	4×5	5×8	47×52	40×57
最大地形起伏/m	38.6(平地)	181.6(山地)	729.3(高山地)	109.3(丘陵地)
GPS 数据更新率/s	2	0.5	1	1
GPS 初始化/min	10	10	5	5
GPS 静态观测/min	5	5	5	5
GPS 偏心分量/m	0.303, -0.110, -2.029	0.303, -0.110, -2.002	-2.015, -0.030, 3.102	2.034, -0.520, 1.320

从图1 可以看出, GPS 精密单点定位与差分定位结果存在一定的差异, 且没有明显的规律性。整体看来, X 方向的坐标差值较小, Y, Z 方向的坐标差值较大, 但最大坐标差值不超过 0.4 m。究其原因, 主要是因为: 在差分 GPS 定位中, 由于 GPS 基准站离最远摄站的距离为 138 km, 高差均大于 9.1 km, 所以对对流层延迟对基准站和流动站的影响是不一样的, 即使通过差分方法也不

能完全消除其误差。对于 GPS 精密单点定位, 由于对流层天顶延迟的估计并不能完全符合实际观测情况, 并且观测值中可能存在未探测出的小周跳, 均会造成一定的定位偏差。此外, 卫星钟差和轨道是用 IGS 的产品, 尽管 IGS 给出的轨道和钟差产品的精度已经相当高, 但对几个小时的动态 GPS 观测数据仍然存在一定的影响, 特别是卫星钟差对单点定位结果有严重影响。根据

Chen 等的研究, 历元采样间隔取 5 min 比取 5 s 时所获得的定位中误差提高将近一倍, 这主要是由于内插卫星钟差误差所造成的^[10]。而在高动态定位时, 由于观测值采样率很高, 内插卫星钟差是必不可少的, 因此 GPS 精密单点定位的结果会存在一定的误差。两方面的综合影响, 最终导致两种定位结果存在一定的差异。

分析其他试验区的数据处理结果, 规律基本相同。限于篇幅, 不一一列举。

3 GPS 辅助光束法区域网平差

3.1 试验资料综述

为了分析基于精密单点定位的 GPS 辅助空中三角测量精度, 本文对摄自各种地形的 1:2 500 ~ 1:60 000 摄影比例尺的多组航摄像片(详见表 1)进行了 GPS 辅助光束法区域网平差, 并对

基于精密单点定位和差分定位获取的摄站坐标的平差结果进行了对比分析。

3.2 GPS 辅助光束法区域网平差精度分析

所有航摄负片经扫描成 21 μm 的数字影像后, 在国产 JX-4 数字摄影测量工作站上对试验 3 影像、在自行研制的 POS 辅助光束法区域网平差程序 WuCAPS^[11] 上对试验 1、试验 2、试验 4 影像进行了量测和自动转点, 并人工立体量测了全部地面控制点的像片坐标, 经带粗差剔除功能的模型相对定向后统计出像点坐标的总体量测精度(中误差)均优于 ±6.0 μm。以此为基础, 分别根据差分 GPS 定位和精密单点定位获取的摄站坐标, 利用 WuCAPS 系统实施带四角地面控制的 GPS 辅助光束法区域网平差, 表 2 给出了根据大量检查点统计出的实际加密精度。

表 2 带四角控制的 GPS 辅助光束法区域网平差精度

Tab. 2 The accuracy of GPS supported bundle block adjustment with 4 ground control points in the corners

影像	GPS 定位方法	σ / μm	检查点数		最大不符值 / m				中误差 / m			
			平面	高程	X	Y	平面	高程	X	Y	平面	高程
试验 1	差分	8.4	67	67	0.21	0.28	0.299	0.312	0.10	0.11	0.148	0.110
	单点	8.4	67	67	0.21	0.29	0.305	0.273	0.11	0.12	0.158	0.104
试验 2	差分	7.0	151	147	0.27	-0.24	0.303	0.396	0.09	0.09	0.125	0.141
	单点	6.9	151	143	0.23	-0.21	0.252	0.398	0.08	0.08	0.112	0.172
试验 3	差分	7.3	30	30	1.52	-1.67	1.813	-2.022	0.78	0.76	1.089	0.929
	单点	7.3	30	30	1.48	-1.69	1.837	-2.282	0.79	0.72	1.069	0.875
试验 4	差分	6.2	25	25	3.91	4.58	4.673	-2.550	1.48	1.79	2.323	1.375
	单点	6.4	25	25	3.95	4.78	5.049	-2.510	1.46	1.94	2.424	1.417

注: 1. 不符值 $\delta_i (i = X, Y, Z)$ 为检查点的加密坐标与其野外测量坐标的较差;

2. 中误差是由 n 个检查点的不符值 δ_i 求出的平均中误差, 即 $\mu = \sqrt{\sum \delta_i^2 / n}$; $\mu_{\text{平面}} = \sqrt{\mu_X^2 + \mu_Y^2}$

由表 1 数据可知, 试验 1、试验 2 影像可用于 1:500 ~ 1:2 000 比例尺 4D 产品的生产, 试验 3 影像可用于 1:5 000 ~ 1:10 000 比例尺 4D 产品的生产, 试验 4 影像可用于 1:50 000 比例尺 4D 产品的生产。根据我国现行航空摄影测量内业规范^[11~13] 规定, 试验区 1、试验区 4、试验区 2 和试验区 3 分别属于平地、丘陵地、山地和高山地。分析表 2 试验结果, 可以得出如下结论:

1. 在四角布设地面控制点的情况下, 利用精密单点定位方法获取的摄站坐标进行 GPS 辅助光束法区域网平差, 其结果与基于差分定位的 GPS 辅助光束法区域网平差结果是基本一致的。这是因为尽管两种 GPS 摄站坐标精度完全不同,

但由于其误差呈现航线系统性, 整体平差时只要逐条航线进行系统误差改正, 就可以将其很好地予以补偿, 所以加密结果不会受到影响。

2. 对于试验 1, 加密点的平面和高程精度均优于 0.15 m, 这一加密结果满足我国现行规范对于 1:500 比例尺平地地形测图航测内业加密检查点坐标不符值平面 0.25 m, 高程 0.30 m 的精度要求^[11]。

3. 对于试验 2, 加密点的平面精度优于 0.15 m, 高程精度优于 0.2 m, 完全满足了我国规范对于 1:500 比例尺山地地形测图航测内业加密检查点坐标不符值平面 0.35 m, 高程 0.40 m 的精度要求^[11]。

4. 对于试验3, 加密点的平面精度优于1.1 m, 高程精度优于1.0 m, 完全满足了我国规范对于1:5000比例尺山地地形测图航测内业加密检查点坐标不符值平面 2.5 m, 高程 2.0 m 的精度要求^[12]。

5. 对于试验4, 加密的平面精度优于3.0 m, 高程精度优于1.5 m, 完全满足了我国规范对于1:50000比例尺丘陵地地形测图航测内业加密检查点坐标不符值平面 17.5 m, 高程 3.0 m 的精度要求^[13]。

4 结束语

GPS 辅助空中三角测量技术经过20多年的发展已成为一种易于操作且比较成熟的技术, 在我国国家基础测绘特别是西部困难地区的测图中发挥了巨大的作用。然而, GPS 数据的处理一直采用差分定位模式, 要求作业时必须架设地面基准站, 这是一件非常费时费力的工作, 尤其是当测区范围较大需要设置多个基准站时, 作业难度相当大。GPS 精密单点定位技术出现后, 人们着手试验研究该技术在航空摄影测量中的应用, 本文通过对近两年所获取的各种比例尺多种地形航摄资料的处理发现, 当区域四角布设平高地面控制点时, 利用 GPS 精密单点定位和差分 GPS 定位所获取的摄站坐标分别进行 GPS 辅助光束法区域网平差的精度是基本一致的, 均可满足我国现行航空摄影测量规范要求。这就说明, 在 GPS 辅助航空摄影测量中, 可以无需布设地面基准站, GPS 辅助航空摄影按照常规航空摄影技术规程进行摄影作业是可行的。

致谢: 在 GPS 数据处理和论文的撰写过程中得到了武汉大学张小红副教授的大力帮助, 在此表示感谢!

参考文献:

- [1] YUAN Xiu-xiao. The Principle and Application of GPS-supported Aerial Triangulation [M]. Beijing: The Publishing House of Surveying and Mapping, 2001. (袁修孝. GPS 辅助空中三角测量原理及应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2001.)
- [2] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B3): 5005-5017.
- [3] ZUMBERGE J F, WATKINS M M, WEBB F H. Characteristics and Application of Precise GPS Clock Solution Every 30 Seconds Navigation[J]. Navigation, 1998, 44(4): 449-456.
- [4] LIU Zhi-min, LIN Wen-jie. Development of GPS Precise Point Positioning in Undifferenced phase observation[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2004, 24(3): 340-344. (刘智敏, 林文介. GPS 非差相位精密单点定位技术的发展[J]. 桂林工学院学报, 2004, 24(3): 340-344.)
- [5] LIU Jing-nan, YE Shi-rong. GPS Precise Point Positioning Using Undifferenced Phase Observation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(3): 234-240. (刘经南, 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位技术探讨[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(3): 234-240.)
- [6] ZHANG Xiao-hong, LIU Jing-nan, RENE FORSBERG. Application of Precise Point Positioning in Airborne Survey[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(1): 19-22. (张小红, 刘经南, RENE FORSBERG. 基于精密单点定位技术的航空测量应用实践[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(1): 19-22.)
- [7] KOUBA J, HEROUX P. GPS Precise Point Positioning Using IGS Orbit Products[J]. GPS Solution, 2001, 5(2): 12-28.
- [8] Applanix Product Outline[EB/OL]. http://www.applanix.com/products/pospac_airborne_index.php.
- [9] GPS Software[EB/OL]. <http://www.othermap.com/soft-down/SoftView.Asp?SoftID=497>.
- [10] CHEN Wu, HU Cong-wei, LI Zhi-hua, et al. Kinematic GPS Precise Point Positioning for Sea Level Monitoring with GPS Buoy[J]. Journal of Global Positioning System, 2004, 3(1-2): 302-307.
- [11] GB7930-87, 1:500 1:1000 1:2000 Topographic Maps Specifications for Aerophotogrammetric Office Operation [S]. (GB7930-87, 1:500 1:1000 1:2000 地形图航空摄影测量内业规范[S].)
- [12] GB/T 13990-92, 1:5000 1:10000 Topographic Maps Specifications for Aerophotogrammetric Office Operation [S]. (GB/T 13990-92, 1:5000 1:10000 地形图航空摄影测量内业规范[S].)
- [13] GB 12340-90, 1:25000 1:50000 1:100000 Topographic Maps Specifications for Aerophotogrammetric Office Operation [S]. (GB 12340-90, 1:25000 1:50000 1:100000 地形图航空摄影测量内业规范[S].)

(责任编辑: 张燕燕)