

文章编号: 1000-050X(2000)06-0476-06

无初始化的 GPS 辅助空中三角测量^{*}

袁修孝¹ 陈小明²

(1 武汉测绘科技大学信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉测绘科技大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要 简要介绍了以航线为单元, 通过相位平滑递推算法在航求解双差载波相位观测量整周相位模糊度, 进而确定各摄站空间位置的无初始化 GPS 动态定位原理, 对某测区一组实际航摄资料进行 GPS 数据处理和 GPS 辅助光束法区域网平差, 证实所介绍的算法是正确的、有效的, 所获取的 GPS 摄站坐标可满足空中三角测量的精度要求, 并且用该数据与经初始化 GPS 动态定位获取的 GPS 摄站坐标数据进行 GPS 辅助光束法区域网平差的总体精度是完全一致的。

关键词 GPS 辅助空中三角测量; GPS 动态定位; 无初始化; 精度

分类号 P231. 4; P245; P228. 42 文献标识码 A

众所周知, 在 GPS 辅助空中三角测量中, 利用 GPS 动态定位技术确定曝光时刻航摄仪的空间位置, 总要求在飞机起飞前进行一段相当长时间的 GPS 静态测量(即初始化), 以正确解求整周相位模糊度^[1, 2, 3], 并要求在一个架次的航摄飞行中尽量保证记录到连续的 GPS 信号, 以此为基础来解求可满足摄影测量区域网平差要求的像片定向数据。这个条件实际上是比较苛刻的, 对航空摄影飞行提出了许多技术要求。因为一个航摄飞行架次往往持续数小时, 当飞机爬升、俯冲或拐弯时, 机翼、机身等部位的遮挡难免会造成 GPS 信号失锁。一旦产生周跳, 必须重新确定整周相位模糊度, 尽管目前可用 OTF 技术来解决这个问题^[4], 但 GPS 动态定位的精度会明显降低, 有时还不得不终止航空摄影飞行。这不但增加了航空摄影的作业难度, 还会因此错过难得的摄影天气, 延长生产周期, 造成巨大的经济损失。为此, 就 GPS 辅助空中三角测量而言, 本文提出一种无初始化的 GPS 动态定位方法, 旨在研究按常规作业方式进行带 GPS 信号接收机的航空摄影, 而 GPS 观测数据的测后处理则以航线为单元逐条进行, 通过相位平滑算法确定各单元数据的初始整周相位模糊度, 然后再解算各曝光时刻航摄仪的空间位置, 最后利用所求得的 GPS 摄站坐标进行整体区域网平差。

1 无初始化 GPS 动态定位

1) 对一条航线的 GPS 观测数据, 根据相邻两个历元的载波相位差进行相位平滑递推运算, 求出各个历元伪距观测值的平滑伪距。相位平滑伪距算法是提高伪距精度的一种有效方法, 其数学模型为:

$$\rho(k) = \frac{1}{k} \rho(k) + \frac{k-1}{k} \left\{ \rho(k-1) + [\rho(k) - \rho(k-1)] \right\} \quad (1)$$

式中, $\rho(k)$ 为历元 k 的平滑伪距; $\rho(k)$ 为历元 k 的伪距观测值; $\rho(k-1)$ 为历元 $k-1$ 的平滑伪距; $\rho(k) - \rho(k-1)$ 为历元 $k-1$ 和历元 k 间的载波相位差值。

对于波长为 λ 的载波有:

$$\rho(k) - \rho(k-1) = [\varphi(k) - \varphi(k-1)] \lambda \quad (2)$$

只要给定初始条件 $\rho(1) = \rho(1)$, 便可递推计算出每一个历元的平滑伪距。

根据误差传播定律可得到平滑伪距的方差为:

$$\sigma^2(k) = \frac{(k-1)\sigma^2 + \sigma^2}{k} \approx \frac{\sigma^2}{k} \quad (3)$$

式中, σ^2 为伪距观测值的方差; σ^2 为载波相位观测值的方差。

由于载波相位的观测精度大大高于伪距的观测精度, 因而式(3)中第一个等式分子中的第一项可忽略不计。由此可知, 平滑后伪距的精度将大大提高。

2) 利用以上求得的平滑伪距计算初始载波相位模糊度的浮点解。按下式可由双差平滑伪距计算第 1 历元机载 GPS 天线相位中心的坐标 (X_2, Y_2, Z_2) :

$$\begin{aligned} \nabla \Delta \rho_{12}^{ij}(1) = & \sqrt{(X^j - X_2)^2 + (Y^j - Y_2)^2 + (Z^j - Z_2)^2} - \\ & \sqrt{(X^j - X_1)^2 + (Y^j - Y_1)^2 + (Z^j - Z_1)^2} - \\ & \sqrt{(X^i - X_2)^2 + (Y^i - Y_2)^2 + (Z^i - Z_2)^2} + \\ & \sqrt{(X^i - X_1)^2 + (Y^i - Y_1)^2 + (Z^i - Z_1)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, 上标 i, j 表示双差伪距的卫星号, 下标 1、2 表示地面基准站上的和机载的 GPS 信号接收机; $\nabla \rho$ 为双差平滑伪距。

由于地面基准站为已知点, 上式中只有 3 个未知数 X_2, Y_2, Z_2 , 只要有 3 个双差平滑伪距即可计算该历元的机载 GPS 天线相位中心位置。以该位置为已知值, 可得到双差载波相位模糊度的浮点估值:

$$\nabla \Delta \varphi_{12}^{ij}(1) = \nabla \Delta \rho_{12}^{ij}(1) + \nabla \Delta N_{12}^{ij} \quad (5)$$

式中, $\nabla \Delta N_{12}^{ij}$ 为双差初始载波相位模糊度。

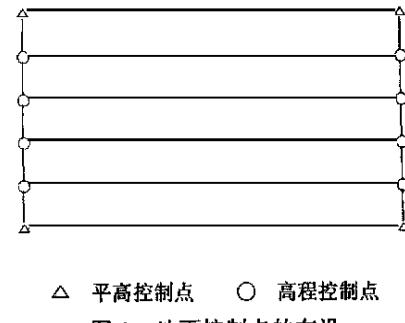
3) 计算各历元的 GPS 摄站坐标。将解算得到的双差载波相位模糊度的浮点估值代入各历元进行计算, 便可得到各历元时刻机载 GPS 天线相位中心的位置。根据 GPS 时标所记录的航摄仪曝光时刻, 经内插可得到航摄仪的空中位置——GPS 摄站坐标。一般来说, 一条航线的摄影时间很短, 卫星图形在该时段内变化较小, 各历元位置偏差可用一阶模型表示。

4) 对其余各航线重复以上计算过程就可得到全区所有的 GPS 摄站坐标。

2 无初始化 GPS 动态定位确定摄站坐标的精度

为了验证上述方法的正确性和有效性, 笔者选用曾经处理过的天津测区航摄资料^[9]进行试验。试验区为一东西走向的长方形区域, 面积约 1100 km^2 , 共覆盖 44 幅 $1:1$ 万地形图。区域北部为高山地, 中部为丘陵地, 南部为平地, 最大地面高差达 561m, 整个试验区属高山区地形。区域四

角各布设了双地面标志, 区域内部用 GPS 导线网配合四等水准实测了大量加密点以作检查点用。为便于坐标转换及区域网平差中改正 GPS 摄站坐标的系统漂移误差, 按图 1 布设了地面控制。



△ 平高控制点 ○ 高程控制点

图 1 地面控制点的布设

Fig. 1 Pattern of Ground Control Points

带 GPS 的航空摄影完成于 1995 年 7 月。航摄仪选用带脉冲输出装置的宽角 Wild RC-30 航摄仪, 机载 GPS 信号接收机是内存为 20MB、数据更新率为 1s 的 Trimble 4000SSE 双频 GPS 信号接收机, 但在测区的两个基准站上分别安置了一台 Trimble 4000SST 双频 GPS 信号接收机。考虑到地面基准站上的两台 GPS 信号接收机只有 1MB 随机内存, 各外接了一台便携式计算机进行实时数据转存。飞机起飞前, 三台 GPS 信号接收机同时进行了长约 50min 的初始化, 在长达 4h 的航摄飞行中, L_1 和 L_2 载波相位观测数据均发生了不同程度的信号失锁。

此次试验采用国产彩红外胶片, 以 $1:3.7$ 万的摄影比例尺沿 $1:1$ 万图幅的图廓线和中心线进行东西向摄影, 测区的东西两端各加摄了一条构架航线, 全区共飞行 12 条航线, 曝光脉冲记录达 621 次, 其中覆盖试验区的有效像片为 434 张, 像片航向与旁向重叠度均达到了 80%。经拷贝的 1022 片基透明正片在国产 JX-3 解析立体测图仪上进行在线人工量测, 像片连接点均为明显地物点, 并根据刺点片直接在解析测图仪上判读。由于在线量测程序的限制和顾及实际生产需要, 像片量测隔片、隔航线进行, 实际参与试验的有关资料技术参数列于表 1。

上述无初始化 GPS 动态定位原理在笔者开发的软件 DDKIN^[4] 中予以程序实现, 利用该软件对每条航线的 GPS 观测数据逐一进行处理, 并将解求的摄站坐标与经初始化后整区求解所得到的 GPS 摄站坐标进行了比较。由两种 GPS 动态定位方法所获得的以航线为单元的 GPS 摄站坐标差值列于表 2。其中, 1~5 条为常规模测图航线, 各

覆盖有42张像片,6、7两条为构架航线,各包含了15张像片。航向相邻两片间的曝光时间间隔大约是11s,一条航线的有效摄影时间约为7.5min。图2直观地显示了每一条航线的GPS摄站坐标差均值及标准差。

从以上试验结果可以看到:

1)无初始化的GPS动态定位与经初始化的常规作业模式相比,所获取的GPS摄站坐标间存在一定差异,且带有系统性,尤其是在平面位置上表现得相当明显,但一条航线内基本上是一个常数;在摄站的高度方向波动较大,且随航线不同而异。图2直观地显示了这一变化规律。

2)就本试验区而言,GPS摄站平面坐标差值带有系统误差。 X 坐标差均为正值,最大为1.704m; Y 坐标差均为负值,绝对值最大不超过1.671m,且每条航线的 X 、 Y 坐标差均值都在1.620m以内; Z 坐标差有正有负,无论是单个摄站还是一条航线内,所有 Z 坐标差均值间都存在

比较大的差异,但具体到一条航线内,其 Z 坐标差值的符号却是完全相同的,即呈现出系统性。

表1 试验区航摄资料技术参数

Tab. 1 Technical Data of Aerial Photos with GPS Data

项 目	参 数
航 摄 飞 机	美国理尔36A型专用航摄飞机
GPS 信 号 接 收 机	1台Trimble 4000SSE、2台Trimble 4000SST
航 摄 相 机	Wild RC-30
像 帧	23cm×23cm
内 方 位 元 素	$f=152.92\text{mm}$, $x_0=0.020\text{0mm}$, $y_0=-0.004\text{0mm}$
摄 影 比 例 尺	1:37 000
航 向 重 叠 度	60%
旁 向 重 叠 度	40%
航 线 数	7
像 片 数	240
加 密 点 数	372
检 查 点 数	平面: 51, 高程: 65
GPS 天线偏心分量	$u=1.821\text{6m}$, $v=0.410\text{6m}$, $w=1.402\text{6m}$

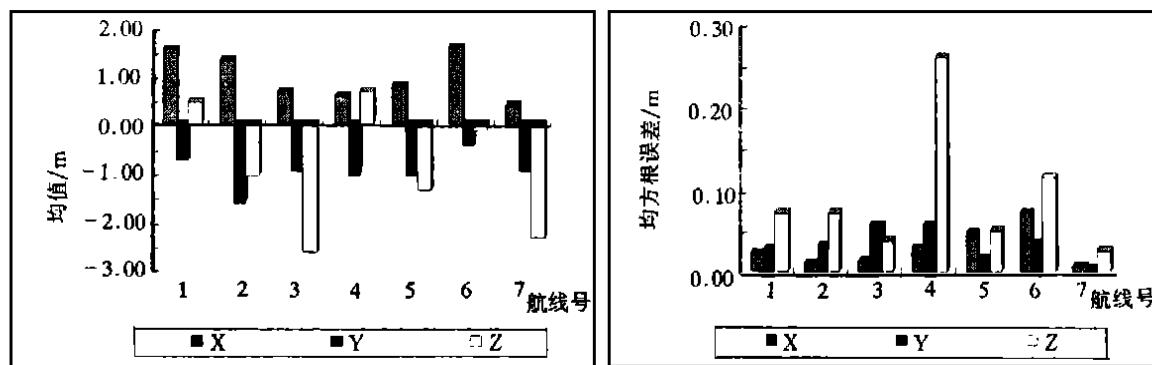


图2 两种GPS动态定位方法所确定的摄站坐标差

Fig. 2 Differences of GPS Camera Positions between Two Kinds of Kinematic GPS Positioning

表2 两种GPS动态定位方法所获取GPS摄站坐标差值

Tab. 2 Differences of GPS Camera Coordinates between Two Kinematic GPS Positioning Solutions

航线号	平均值/m			最大值/m			最小值/m			均方差/m		
	ΔX_A	ΔY_A	ΔZ_A	ΔX_A	ΔY_A	ΔZ_A	ΔX_A	ΔY_A	ΔZ_A	ΔX_A	ΔY_A	ΔZ_A
1	1.517	-0.764	0.426	1.564	-0.806	0.554	1.476	-0.708	0.325	0.021	0.026	0.069
2	1.323	-1.620	-1.082	1.346	-1.671	-1.211	1.312	-1.563	-0.949	0.008	0.029	0.070
3	0.662	-0.990	-2.642	0.677	-1.074	-2.705	0.644	-0.906	-2.584	0.010	0.054	0.037
4	0.557	-1.050	0.640	0.578	-1.141	0.899	0.491	-1.004	0.126	0.028	0.053	0.259
5	0.756	-1.089	-1.389	0.821	-1.123	-1.479	0.686	-1.057	-1.236	0.044	0.014	0.047
6	1.581	-0.455	-0.124	1.704	-0.476	-0.201	1.537	-0.396	0.065	0.069	0.032	0.112
7	0.358	-0.987	-2.345	0.367	-0.991	-2.381	0.347	-0.985	-2.318	0.006	0.002	0.024

注:表中的差值为“无初始化GPS动态定位”减去“经初始化GPS动态定位”所得到的GPS摄站坐标差。

通过上述试验结果的分析可以得出这样一个结论:在GPS动态定位中,整周相位模糊度的确定误差会引起以此为基础所确定的GPS摄站坐

标的一个平移系统误差。就航空摄影测量加密而言,按照60%的航向重叠度设计,若采用1:3.7万的摄影比例尺,一条航线覆盖50张像片,那么,单

条航线的有效摄影时间(即用于该航线 GPS 摄站定位的 GPS 数据记录时间)一般不会超过 15min。在这么短的时间内, 用相位平滑算法所确定的初始相位模糊度进行单航线 GPS 摄站定位所引起的误差应在 m 级范围内, 且平面误差小于高程误差。

3 无初始化 GPS 动态定位对 GPS 辅助光束法平差精度的影响

利用无初始化 GPS 动态定位方法解求的 GPS 摄站坐标当作观测值送入 WuCAPS_{GPS}^[1] 系统中, 与试验区航摄资料一起进行光束法区域网平差。此时, 区域网由 5 条常规测图航线、105 张标准正常重叠(航向重叠度 60%, 旁向重叠度 40%)像片组成。按照图 1 布设的地面控制方案,

表 3 GPS 辅助光束法区域网平差精度
Tab. 3 Accuracy of GPS-supported Bundle Block Adjustment

GPS 动态定位方案	σ_0 / μ m	GPS 摄站坐标中误差/m			实际精度/m				检查点最大残差/m		
		X	Y	Z	μ_X	μ_Y	μ_{XY}	μ_Z	X	Y	Z
经过初始化	16.1	0.006	0.057	0.214	2.017	1.440	2.552	1.202	-4.59	3.71	2.69
无初始化	16.2	0.006	0.057	0.216	2.027	1.445	2.489	1.211	-4.58	3.73	2.63

注: 实际精度是由 n 个检查点的坐标不符值 Δ_i 求出的平均中误差, 即 $\mu_i = \sqrt{\sum \Delta_i^2 / n}$ ($i = X, Y, Z$); $\mu_{XY} = \sqrt{\mu_X^2 + \mu_Y^2}$ 。

表 4 GPS 辅助光束法平差中所解求的线性漂移误差改正参数

Tab. 4 Parameters of GPS Drift Errors in GPS-supported Bundle Block Adjustment

GPS 动态定位方案	航线号	a_X	a_Y	a_Z	$b_X / 10^{-3}$	$b_Y / 10^{-3}$	$b_Z / 10^{-3}$
经过初始化	1	-2.90	-2.01	-6.69	-3.24	8.61	1.06
	2	-1.22	2.29	-7.63	7.09	-7.41	3.44
	3	-3.01	-5.35	-6.54	-4.82	6.42	-0.79
	4	-3.13	-1.74	-7.85	-5.96	3.69	-2.13
	5	-3.23	-4.03	-7.76	-3.91	14.1	-2.59
无初始化	1	-3.80	-1.27	-9.36	-3.68	8.45	1.31
	2	-2.35	3.04	-8.96	7.30	-7.05	3.12
	3	-3.76	9.68	-6.25	-4.82	6.69	-0.29
	4	-4.26	-9.73	-7.67	-5.55	3.32	-0.29
	5	-4.72	-2.57	-9.15	-4.29	13.9	-1.74

2) 通过表 4 可以看到, 3 个坐标平移参数 a_X 、 a_Y 、 a_Z 有比较大的差异, 而反映随时间线性变化的 3 个参数 b_x 、 b_y 、 b_z 基本上是一致的, 且都非常小, 这就证实了 §2 所得到的无初始化 GPS 动态定位所引起的主要是系统平移误差的结论。由于 GPS 动态定位所求得的 GPS 摄站坐标仅作为 GPS 辅助光束法区域网平差中的一种观测值, 平差模型中, 采用类似于自检校的方法——线性漂移误差改正就能很好地消除这一部分系统误差的影响。因此, 初始相位模糊度解不正确会影响 GPS 摄站坐标的绝对精度, 而对 GPS 辅助光束法

在区域网四角布设 4 个平高地面控制点, 区域两端各设置一排高程地面控制点(共 9 个), 经对每条航线分别引入一组漂移误差改正参数进行 GPS 辅助光束法区域网平差, 根据地面上 51 个平面和 65 个高程检查点的坐标不符值统计得到表 3 的加密精度。为便于比较, 按照完全相同的平差条件, 改用经过大约 50min 初始化的 GPS 动态定位摄站坐标重新进行 GPS 辅助光束法区域网平差, 根据完全相同的检查点进行精度评定, 结果见表 3。表 4 为 GPS 辅助光束法平差所解求的各航线 6 个线性漂移误差改正参数。

分析上表的平差结果, 可以得到:

1) 由表 3 可以看出, 用两种 GPS 动态定位方法所确定的航摄仪位置数据辅助光束法区域网平差得到的加密点坐标总体精度是完全一致的。这说明笔者所提出的方法是可行的。

区域网平差的最终结果不会产生致命影响, 只要区域网中有足够的地面控制点, 通过引入漂移误差改正参数的方法就能补偿这一部分系统误差。图 3 证实了这一点。

图 3 显示, 就每一个加密点而言, 其平面位置几乎无差异, 但是, 高程略有不同。通过分析 372 个加密点的坐标差值可以得到, X 坐标差值位于 $-0.109\text{m} \sim 0.094\text{m}$ 之间, Y 坐标差值全都落在 $-0.116\text{m} \sim 0.057\text{m}$ 内, 高程差值整体上要大于平面坐标差值, 其最大值达到了 0.296m 。尽管如此, 并未使两种平差结果产生实质性差异。根据我

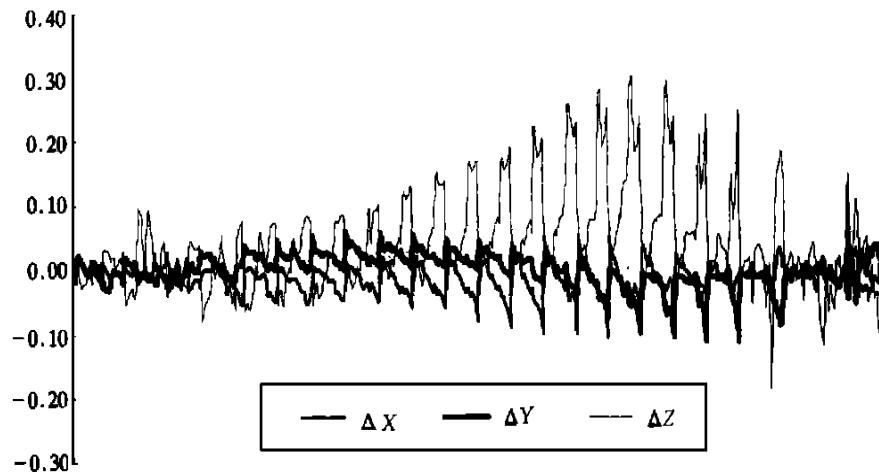


图 3 用两种 GPS 摄站位置数据辅助光束法区域网平差后的加密点坐标差值

Fig. 3 Differences of Photogrammetric Point Coordinates by GPS-supported Bundle Adjustment between Two Kinds of GPS Camera Positions

国现行《航空摄影测量规范》规定,对高山区 1:1 万地形图的航测成图,要求摄影测量加密中检查点的不符值满足:平面 $\leq 5.0\text{m}$,高程 $\leq 3.0\text{m}^{[5]}$,以上加密结果均满足了规范的精度要求。

4 结语

动态 GPS 定位中,由于不能正确确定整周相位模糊度,会降低以此为基础求解 GPS 摄站坐标的绝对精度,由此引起的主要是一种坐标平移系统误差。就 GPS 辅助空中三角测量而言,由于 GPS 摄站坐标被视为带权观测值,只要区域网中有足够的地面控制点,通过引入漂移误差改正参数的方法就能很好地补偿这一部分系统误差,对最终的区域网平差精度不会产生实质性影响。由此,笔者提出在 GPS 辅助空中三角测量中,可以使用无初始化的 GPS 动态定位模式,以航线为单元,通过相位平滑方法分别解求各自的整周相位模糊度,进而获取所需的 GPS 摄站坐标。具体做法是:航空摄影时,当飞机进入测区后开启 GPS 信号接收机进行观测,摄影完毕可立即关闭 GPS 信号接收机返航;GPS 观测数据处理时,以航线为单元逐一进行,先通过相位平滑算法确定该单元数据的整周相位模糊度再行求解;GPS 辅助光束法区域网平差时,在区域的四角各布设一个平面控制点外加区域两端各布设一排高程控制点或各敷设一条垂直构架航线,并对每条航线引入各自的漂移误差改正参数,整体平差就可得到加密

点坐标。这样,带 GPS 的航空摄影作业完全可以按照常规方式进行,只要保证单条航线内的 GPS 信号连续(不连续时,可分成多条航线处理),不必担心航线切换、飞机拐弯时的 GPS 信号失锁。为此,可大大放宽对航空摄影的要求,降低其作业难度,这对 GPS 辅助空中三角测量的推广应用将具有非常深远的意义。

参 考 文 献

- 1 袁修孝. GPS 辅助空中三角测量原理及应用. 北京: 测绘出版社, 2000
- 2 Ackermann F. GPS for Photogrammetry. Tutorial on Mathematical Aspects of Data Analysis. ISPRS, ICWG III/VI, 1991. 17~70
- 3 Fries P. Aerotriangulation with GPS —— Methods, Experience, Exception. The 43rd Photogrammetric Week, Stuttgart, 1991
- 4 陈小明. 高精度 GPS 动态定位的理论与实践. [学位论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1997
- 5 国家技术监督局. 1:5 000、1:10 000 地形图航空摄影测量内业规范. 北京: 中国标准出版社, 1993
- 6 Yuan X X. Principle, Software and Experiment of GPS-supported Aerotriangulation. Geospatial Information Science, 2000, 3(1): 24~33

袁修孝,男,36岁,博士,教授。现主要从事解析摄影测量和数字图像处理的科研和教学工作。代表成果:高精度摄影测量定位理论与方法;GPS 辅助空中三角测量等。已出版专著一部,发表论文 40 余篇。

E-mail: yxxqhyw@public.wh.hb.cn

GPS-supported Aerotriangulation with Ambiguity Resolution on the Fly

YUAN Xiuxiao¹ CHEN Xiaoming²

(1 School of Information Engineering, WTUSM, 129 Luoyu Road, Wuhan, China 430079)

(2 National Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, WTUSM, 129 Luoyu Road, Wuhan, China 430079)

Abstract In the ordinary operation of GPS kinematic surveying on aerial triangulation, a long-time static initialization is necessary to solve a correct ambiguity before the start of the flight. Even as we know, the static initialization is a time-consuming, costly, and difficult procedure. Sometimes the flight mission has also to be interrupted and the static initialization must be executed again because the cycle slip in carrier phase measurements is created. In order to obtain continuous records of GPS signals, we stipulate some constraint norm for the aerial photographic flight of GPS blocks. In fact, this is harmful to the actual application of GPS-supported aerotriangulation. Therefore, it is important and urgent to investigate a kind of approach of camera air positions determining by differential kinematic GPS positioning with ambiguity resolution on-the-fly (OTF). This paper will describe such an approach adopted in our practice. Firstly, we use a recursive algorithm of phase smooth based on the carrier phase difference between adjacent epochs to get the smooth pseudo-range of the C/A code measurements at each epoch. Secondly, we solve a float estimation of ambiguity for the double difference carrier phase's observables at a strip using the above smooth pseudo-range. Finally, we determinate 3D coordinates of the exposure centers of the airborne camera by means of the obtained ambiguity solution. This approach is implemented strip by strip instead of whole block. It does not consider the cycle slips happening during the turn around from one flight line to the next, so that the aerial photography is able to perform in the conventional operation specification. For testing the accuracy of positioning projective centers of airborne camera by the above method and efficiency of GPS-supported bundle block adjustment, a set of actual aerial photos with GPS data taken from Tianjin project was selected and processed by software DD-KIN (DGPS dual frequency kinematic surveying) and WuCAPSGPS (Wuhan GPS-supported bundle block adjustment). The achieved results have shown that our proposing scheme is feasible as well as the overall accuracy of GPS-supported bundle block adjustment is closer identical between ambiguity solutions initialized on the ground before taking off and resolved on the fly. The OTF algorithm, however, will greatly relax the operational constraint for the aerial photographic flight of GPS blocks and be of great importance to apply widely GPS-supported aerotriangulation into practical production.

Key words GPS-supported aerotriangulation; relative kinematic GPS positioning; ambiguity solution on the fly; accuracy

YUAN Xiuxiao, male 36, Ph. D. professor. He is concentrated on the research and education in analytical photogrammetry and digital image processing. His typical achievements are theories and methods for high precision photogrammetric positioning and GPS-supported aerotriangulation, etc. His one monograph has come out and his published papers are about 40.

Email: yxxqxyw@public.wh.hb.cn