

文章编号: 1007-4619 (2000) 01-0022-05

适用于机载三维遥感的动态 GPS 定位技术及其数据处理

尤红建, 李树楷

(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要: 机载三维遥感采用动态 GPS 定位技术提供遥感器的空中精确位置, 能快速高效获得遥感地学编码图像和 DEM, 该文对中国自行研制、具有独创性的机载三维遥感影像制图系统中的动态 GPS 定位技术特点和要求进行了分析, 论述了应用于三维遥感的 GPS 定位数据处理和算法流程。

关键词: 三维遥感; 动态 GPS; 数据处理

中图分类号: TP73/P228.4 **文献标识码:** A

1 引言

遥感作为一种获取地球表面信息的重要技术手段, 已经在国内外得到了广泛的应用和发展。进入 90 年代以来, 人们对遥感的定位提出了更高的要求, 因为传统的遥感要依赖地面控制和立体观测或背景地图等手段获得定位信息, 周期长、效率低, 很难适应要求。随着全球定位系统 GPS 进入到完全运作阶段(FOC)以及高重复频率激光测距技术的应用, 将 GPS 定位技术、惯性导航技术(INS)、激光测距技术进行集成得到机载扫描激光地形系统已成为国内外遥感界的研究热点之一, 并依此来为同机或同步获得的遥感图像提供定位信息, 它完全摆脱了对地面的控制, 节省了大量的人力和物力, 从而大大提高了遥感作业效率。如美国的 AIMS 和 FLI-MAP、加拿大的 SHOALS 和 ALTM¹⁰²⁰、瑞典的 TopoEye 等系统^[1], 它们一般都利用了 GPS、INS、激光测距组成空-地定位系统, 可以快速获得高精度的数字高程模型(DEM), 其中的一些能和遥感影像联合处理得到地学编码影像。李树楷于 90 年代初创新性地提出将激光测距和扫描成像仪在硬件上实现严格匹配形成了扫描测距-成像组合遥感器, 再和 GPS、INS 进行集成构成三维遥感影像制图系统^[2], 在国家 863 计划信息获取与处理技术主题(308 主题)的支持

下, 已于 1996 年完成了原理样机的研制, 并从 1998 年开始进入实用型系统的研制。三维遥感影像制图系统的最大特点在于在无地面控制条件下实时快速处理出 DEM 和地学编码影像。

目前国内外的机载扫描激光地形(或遥感)系统几乎均利用了 GPS 作为空中定位的技术手段, 这是因为 GPS 具有定位精度高、稳定可靠、全天候可用的特点。其实早在 80 年代末, 人们就已开始研究 GPS 在摄影测量上的应用并获得了成功, 现在 GPS 辅助空中三角测量已经应用于生产作业了。在机载三维遥感影像制图系统中 GPS 定位系统是提供定位信息十分重要的遥感器, 与 GPS 的其它应用不同, GPS 用于机载三维遥感制图系统也有一些特殊要求, 如数据的同步采集、GPS 天线位置和遥感器光学中心位置不重合、机载飞行条件下的数据要求等, 此外 GPS 的数据处理也有其特殊性。下面针对机载三维遥感制图系统中的动态 GPS 定位技术和数据处理进行详细阐述。

2 适用于机载三维遥感的 GPS 定位技术及其特点

2.1 GPS 定位技术的发展

GPS 定位系统是美国继阿波罗登月计划后投资最大的第 2 个空间计划, GPS 已于 1995 年 3 月进入

收稿日期: 1998-09-09; 修订日期: 1998-11-12

基金项目: 国家 863 计划 308 主题支持项目“三维信息获取与实时处理技术系统原理样机”的部分成果。

作者简介: 尤红建(1969-), 男, 助理研究员, 在读博士。主要从事于 GPS 应用研究以及 GPS 和遥感的集成技术研究。已公开发表论文 10 篇。

完全运作阶段, 这样可以为全球各地的用户提供全天 24 小时的无缝定位。美国出于军事目的而对 GPS 实施“SA”政策, 使得单机定位只能达到 100 m (只能用于低精度的导航定位), 而高精度定位导航必须应用差分技术提高精度, 它一般均要采用两台或多台接收机构成差分系统。由于 GPS 系统有伪距和载波相位两种测量值(测量精度分别为分米和毫米级), 因此差分也就有伪距差分(定位精度可以达到米级、甚至亚米级)和相位差分(定位精度厘米级)。实际作业时要架设数据通讯链构成实时差分系统, 一般可以选用 UHF、VHF 数传电台。目前伪距实时差分已得到广泛的应用, 自 1994 年以来, 实时载波相位差分 RTK (Real-time Kinematic) 系统也开始进入商业应用阶段, 其实时定位精度达到了几个厘米。因此差分 GPS 技术的定位精度完全可以满足遥感应用的精度要求。

2.2 机载三维遥感对 GPS 定位的要求及特点

机载三维遥感属于动态飞行作业, 要求尽可能得到高精度的遥感器空中三维坐标, 因此机载三维遥感中的 GPS 定位应具备如下特点和性能:

高精度差分 GPS 定位 机载三维遥感要求采用差分 GPS 系统, 为此必须在测区的坐标已知点上架设一台高性能 GPS 接收机(配备大地型 GPS 静态天线)作为基准站, 同时还必须架设数据发射电台, 以便把必要的数发送给作业飞机上的接收电台。为了保证实时 GPS 定位的精度可靠, 基准站一般应架设在测区较为中心的制高点上, 且远离高压线、水面和大型构筑物以防可能对 GPS 产生多路径信号的干扰源。

GPS 数据和遥感数据的同步联系 为了将 GPS 数据应用于机载三维遥感的定位, 就要使 GPS 数据和遥感数据发生直接联系, 一般采用 GPS 接收机实时记录遥感器扫描脉冲时刻的方法, 因此机上 GPS 接收机应该具备实时记录外部脉冲信号时刻的事件标记(Event Mark)功能(目前大部分测量型 GPS 均可配备这个功能选项)。这样扫描测距遥感器扫描到地面某个像元时会产生同步脉冲信号, GPS 可以立即接收到这个信号并求出这个时刻在 GPS 时间系统中的时刻(精度可以达到 1 μ s), GPS 接收机可以把这个时刻存储在内存里(如 Trimbel、Ashetech 等测量型 GPS 接收机)。遥感应用中迫切希望能实时从 GPS 接收机中提取定位结果, 目前有个别接收机已经具备了这一功能(如 NovAtel 接收机), 但还必须精

确知道接收机接收到卫星信号时刻到给出定位结果时刻的时间延迟, 因为 10 ms 的延迟对于静态用户是没有多少影响的, 但对于飞行速度为每秒几十米到数百米的遥感用户却意味着近半米到数米的误差, 因此实时读取定位数据时, 必须严格计算这个时间延迟。GPS 在机载三维遥感影像制图系统中的功能联系如图 1。

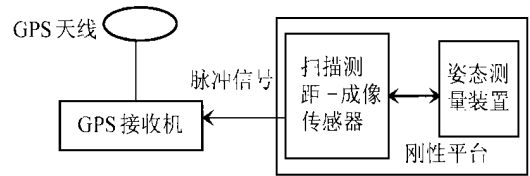


图 1 GPS 和机载遥感器的功能联系

Fig. 1 Function link of GPS with airborne remote sensor

适应机载动态飞行作业要求 机载三维遥感影像制图系统是一种动态飞行作业环境, 因此 GPS 接收机的动态性能要好, 一般必须适合遥感平台每秒几十米到几百米的高速度飞行和一定的加速度性能, 满足一定的防震、抗振标准; GPS 天线也必须是高动态性能(配备高灵敏的前置放大器), 能在高速运动中快速捕获 GPS 信号并尽量保持不失锁。由于 GPS 只能计算出 GPS 天线所在的位置, 它与扫描测距遥感器的光学中心位置不可能重合, 因而存在矢量关系, 即偏心矢量, 必须在野外精确测定, 可以采用近景摄影测量法、经纬仪和全站仪测量法、平板玻璃直接投影测量法等成熟的方法^[3]。为了使 GPS 数据处理的高精度, GPS 接收机的数据采样间隔越小越好, 目前不少 GPS 已经具备了 20Hz 采样率的高速采样功能, 即每秒可以给出 20 个定位结果, 完全可以满足航空遥感的应用要求

3 机载三维遥感的 GPS 数据处理

GPS 数据处理是将 GPS 数据变成符合遥感实际应用的遥感器光学投影中心的位置, 处理过程如图 2。

3.1 GPS 差分处理

为了得到高精度定位结果, 一般要求采用差分技术才能达到米级甚至厘米级的三维位置。若采用实时差分技术, 就必须配备数传电台, 同时还要用微机实时记录定位结果。地面基准站 GPS 接收机和机载 GPS 接收机所接收的原始测量数据还能进行事后高精度处理, 这样可以作为一种数据备份, 而且

事后处理精度常常要高于实时定位。事后差分处理一般利用 GPS 载波相位数据进行动态解算, 可以采用搜索算法、卡尔曼滤波算法等一些成熟的算法进行载波相位模糊度计算。目前事后处理速度也很快, 且精度能优于几个厘米。

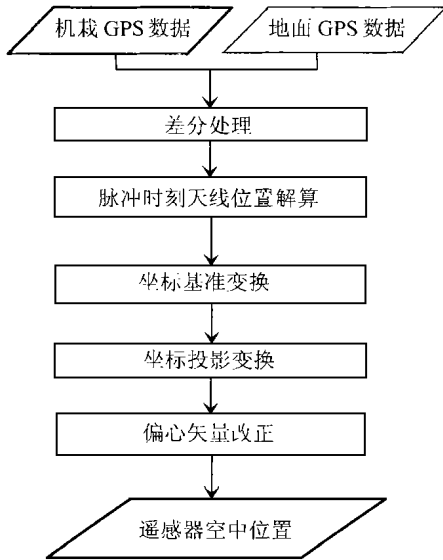


图 2 GPS 数据处理流程
Fig. 2 GPS data processing flow

3.2 扫描脉冲时刻 GPS 天线同步位置的解算

由于 GPS 定位只能按固定的某种采样率(如 1 秒 1 次或每秒最多 20 次)进行 GPS 天线位置的高精度测量和求解, 而扫描测距-成像遥感器扫描到某个像元的脉冲时刻是任意的, 它与 GPS 给出的测量结果在时间上不能做到严格同步, 因此必须根据扫描脉冲时刻 t 等间隔的 GPS 定位结果序列中拟合内插出来。一般可以采用多项式最小二乘拟合算法来精确内插出脉冲时刻的三维位置 (X, Y, Z) 。经过多次试验和检测, 利用脉冲时刻前后各 5 s 的 GPS 定位结果进行 3 次曲线拟合处理, 完全可以达到厘米级的拟合精度, 同时由于采用了“移动窗口”(前后各几秒的数据)的序贯算法, 运算时间短, 4 h 飞行数据只需 5 min 即可完成, 而且精度保证。内插模型为:

$$\begin{cases} X(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \\ Y(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 \\ Z(t) = c_0 + c_1t + c_2t^2 + c_3t^3 \end{cases} \quad (1)$$

系数 $a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3, c_0, c_1, c_2, c_3$ 根据时刻 t 前后各 5 s 数据, 采用最小二乘法进行反求。

3.3 坐标基准转换

GPS 所有的观测和计算都是以 WGS-84 (World Geodetic System 1984 年) 椭球作为坐标参照基准, 而中国遥感和制图却普遍采用北京 54 椭球作为坐标基准, 为此必须按 Bursa-Wolf 转换模型的公式进行坐标基准变换:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{BJ-54} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 + \Delta k & \epsilon_Z & -\epsilon_Y \\ -\epsilon_Z & 1 + \Delta k & \epsilon_X \\ \epsilon_Y & -\epsilon_X & 1 + \Delta k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{WGS-84} \quad (2)$$

其中 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 为 3 个原点坐标平移参数, $\epsilon_X, \epsilon_Y, \epsilon_Z$ 为 3 个坐标旋转参数, Δk 为尺度比参数。

这 7 个转换参数一般可从国家测绘部门获得, 也可以利用两个坐标参照系内均匀分布的几个公共的坐标已知点进行反求。对于局部地区面积不大 (50 km 范围内), 可以认为 $\epsilon_X, \epsilon_Y, \epsilon_Z, \Delta k$ 都是 0, 而变成 3 个参数的转换公式。

3.4 坐标投影变换^[4]

经基准转换后的大地地理坐标 (φ, l) 还必须进行投影变换而变成高斯平面坐标:

$$\begin{aligned} x &= s + \frac{\lambda^2 N}{2} \sin \varphi \cos \varphi + \frac{\lambda^4 N}{24} \sin \varphi \cos^3 \varphi (5 - \text{tg}^2 \varphi + 9 \eta^2 + 4 \eta^4) + \frac{\lambda^6 N}{720} \sin \varphi \cos^5 \varphi (61 - 58 \text{tg}^2 \varphi + \text{tg}^4 \varphi) \\ y &= \lambda N \cos \varphi + \frac{\lambda^3}{6} N \cos^3 \varphi (1 - \text{tg}^2 \varphi + \eta^2) + \frac{\lambda^5}{120} N \cos^5 \varphi (5 - 18 \text{tg}^2 \varphi + \text{tg}^4 \varphi + 14 \eta^2 - 58 \text{tg}^2 \varphi \cdot \eta^2) \end{aligned} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} N &= \frac{a}{\sqrt{1 - e'^2 \sin^2 \varphi}} \\ s &= \frac{N \lambda'' \cos \varphi}{\rho''} \\ \eta^2 &= e'^2 \cos^2 \varphi \end{aligned}$$

$$\lambda = l - l_0, \quad a = 6378245.0, \quad e'^2 = 0.006738525414684$$

利用此公式的换算精度为 0.001 m。 l_0 为中央

3.5 偏心矢量改正^[5]

由于 GPS 天线相位中心不能与扫描成像-测距遥感器光学中心一致, 两者之间存在一段距离, 即存在偏心矢量, 通过野外测量可以精确测定出偏心矢量 (u, v, w) , 同时能从姿态测量装置得到该时刻的 3 轴姿态参数, 从而可以按坐标变换公式求出光学中心的位置:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{Sensor}} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{Antenna}} - \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:

$$A_1 = \cos \psi \cos \kappa - \sin \psi \sin \omega \sin \kappa$$

$$A_2 = \cos \psi \sin \kappa - \sin \psi \sin \omega \cos \kappa$$

$$A_3 = -\sin \psi \cos \omega$$

$$B_1 = \cos \omega \sin \kappa$$

$$B_2 = \cos \omega \cos \kappa$$

$$B_3 = -\sin \omega$$

$$C_1 = \sin \psi \cos \kappa + \cos \psi \sin \omega \sin \kappa$$

$$C_2 = -\sin \psi \sin \kappa + \cos \psi \sin \omega \cos \kappa$$

$$C_3 = -\cos \psi \cos \omega$$

而其中的 3 个姿态参数: 俯仰 ψ 侧滚 ω 航向 κ 由姿态测量装置(惯性导航系统 INS)来同步测量。

经过上述处理就能得到扫描测距-成像遥感器在扫描时刻光学中心的三维位置。

4 试验飞行和数据处理

1997 年 5 月至 6 月间, 中国 863 计划支持开发的三维遥感制图系统按用户的要求在北京的九里山和内蒙古的东胜煤田、托可托、固阳、呼和浩特市等 5 个地区进行了实际飞行。飞行高度在 600 m 左右, 动态 GPS 定位主要采用了 Ashtech MD X II 测量型(单频)接收机和 NovAtel 3151 R 差分型 GPS 接收机(单频), GPS 接收机和其他设备进行同步数据采集。其中 NovAtel 3151 R 和 UHF 数据电台构成实时差分 GPS 系统, 其实定位结果进行存储并同时向导航显示系统提供定位结果进行飞行导航, Ashtech MD X II 用于接收扫描测距-成像遥感器的同步脉冲信号。在 5 次飞行中均取得了完整的数据, 经过采用上述的处理流程和算法对飞行地区的 GPS 数据进行了处理, 并获得了扫描时刻光学中心的三维位置, 再利用该三维位置以及姿态数据、激光测距数据

计算地面采样点的三维位置, 从而产生地面的 DEM, 同时利用地面样本点的三维位置和同步获得的遥感光谱数据, 产生了测区的地质编码图像, 其结果是令人满意的。

为了检验最终 DEM 的精度, 中国核工业部北京地质研究院对北京九里山测区进行检测, 利用 GPS 在测区的明显地物进行测量, 并把测量结果和机载三维遥感获得的结果进行比较, 统计显示机载三维遥感的精度为 6-8 m。由于姿态测量的精度为 2' 左右, 激光测距精度在 1 m 左右, GPS 给出的定位结果精度在 1 m 左右, 此处还有硬件上的装配误差, 这些误差的存在导致了最终的 DEM 精度在 6-8 m 左右。从这些处理结果和精度来看 GPS 定位技术和数据处理是合理的, 为了进一步提高机载三维遥感的系统精度, 必须采用双频 GPS 接收机, 这样才能保证定位精度达到厘米级, 同时还要提高 GPS 数据处理的算法精度。

5 结 论

三维遥感影像制图系统作为一种全新的遥感系统, 它必须采用 GPS 对遥感器的三维空中位置进行精确求解, 因此对 GPS 定位技术提出了一些新的要求, 而且 GPS 数据处理也不同于一般的 GPS 数据处理。适用于三维遥感 GPS 定位系统一般要求具备实时动态定位性能、高速采样、必须能和遥感器的数据进行同步联系, 而且定位精度要满足遥感应用的要求。应用于三维遥感的 GPS 数据要进行差分处理、同步数据的内插、坐标基准转换、投影变换、偏心矢量改正等处理才能得到满足遥感实际应用的遥感器光学中心的精确位置。文中所阐述的 GPS 定位技术和数据处理对一般的遥感系统中的定位也具有借鉴作用, 随着遥感应用水平的提高, 尤其是对定位要求的提高, GPS 定位技术必将在遥感的信息获取和数据处理中发挥越来越大的作用。

参考文献 (References)

- [1] Li Shukai, Liu shaochuang. Development of Airborne/Mobile Laser Scanning Range/Image Mapping System [J]. *China Journal of Image and Graphics* 1999, 3 (2). [李树楷, 刘少创. 机载/车载激光扫描测距/成像制图系统的最新进展[J]. 中国图象图形学报, 1999, 3(2).]
- [2] Li Shukai. Airborne Laser Image Mapping System [A]. Chen Shupeng, Tong Qingxi, Guo Huadong. Mechanism of Remote Sensing Information [C]. Beijing: Science Press, 1998. [李对楷. 机载激光

- 遥感影像制图系统[A]. 陈述彭, 童庆禧, 郭华东. 遥感信息机理研究[C]. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [3] Li Deren. Application of GPS in Photogrammetry and Remote Sensing [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1996. [李德仁. GPS 用于摄影测量与遥感[M]. 北京: 测绘出版社, 1996.]
- [4] Zhu Huatong. Common Geodetic Datum and Transformation [M]. The Chinese People's Liberation Army Press, 1990. [朱华统. 常用大地坐标系及其变换[M]. 解放军出版社, 1990.]
- [5] Liu Jiyu, Li Zhenghang, Wang Yuehu, *et al.*, The Principle and Application of Global Positioning System [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1993. [刘基余, 李征航, 王跃虎等. 全球定位系统原理及其应用[M]. 北京: 测绘出版社, 1993.]

Kinematic GPS Positioning Technique and Data Processing Used in Airborne 3D Remote Sensing System

YOU Hong-jian LI Shu-kai

(*Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

Abstracts: Airborne laser image and mapping system (ALIMS) which integrates kinematic GPS positioning system, laser range finder, attitude measurement unit and optical-mechanical scanner into a rigid platform can generate DEM (digital elevation model) and geo-referenced image rapidly and efficiently. We regard ALIMS as a 3D remote sensing system, because it can directly obtain 3D position together with spectral information. Kinematic GPS is a key sensor that is able to give the precise 3D position of the platform. In this paper we present the kinematic GPS technology and data processing techniques. First, we analyse the GPS technical requirement which can suit for ALIMS. For example, why do we need high differential GPS positioning technique, how to synchronize GPS data with remote sensing data, and why collecting high rate GPS data is important. Then, we discuss the GPS data processing procedure, including differential GPS processing, solution of pulse's position, datum transformation, coordinate project and eccentric correction. In several airborne experiments we have applied kinematic GPS positioning technology and corresponded data processing, and the result is satisfactory.

Key words: 3D remote sensing; kinematic GPS; data processing