

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005115

后差分方法在空中三角测量 POS 数据精度优化中的应用

朱 杰

(青海省核工业地质局 西宁 810006)

摘要: 针对大范围、复杂的野外测量环境下,多点布设外业测控点,难度较大,且耗时耗力的问题,文章以后差分方法优化 POS 数据精度为研究基点,基于后差分原理,进行两层面创新。首先,基于外方位元素对 POS 数据精度的影响,利用相机延迟测定及控制技术获取真实的 POS 数据,并融合码伪距和载波相位双差方程,通过建构基于 UbloxN-M8T 芯片的后差分 GNSS 模块,来消除 POS 数据误差;同时,使用联立 GPS 与 IMU 观测值方程的光束法区域网平差模型,通过平差循环迭代运算,获取精度最优的 POS 数据,并据此,在不同的控制点方案下生成 DOM 正射影像,通过成像精度测评,得出后差分可显著提升 POS 数据精度,且在极少控制点、无架构航线下的效用更为明显。

关键词: 后差分;空中三角测量;POS 数据;像控点

中图分类号: TP35 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.1050

Application of post difference method in accuracy optimization of POS data in aerial triangulation

Zhu Jie

(Qinghai Provincial Nuclear Industrial Geological Bureau, Xining 810006, China)

Abstract: In view of the large-scale and complex field measurement environment, it is difficult and time-consuming to set up field measurement and control points at multiple points. In this paper, the optimization of POS data accuracy by differential method is the research base point, and two-level innovation is carried out based on the post difference principle. Firstly, based on the influence of external orientation elements on the accuracy of POS data, the real POS data is obtained by using camera delay measurement and control technology, and the double difference equation of code pseudo range and carrier phase is fused. The post differential GNSS module based on ubloxn-m8t chip is constructed to eliminate the error of POS data. At the same time, the bundle method area network adjustment model of simultaneous GPS and IMU observation equation is used through the evaluation of imaging accuracy, it is concluded that the post difference can significantly improve the accuracy of POS data, and the utility is more obvious under few control points and no structure routes.

Keywords: post difference; aerial triangulation; POS data; image control point

0 引 言

低空无人机航测因为其质轻、体积小,易受空气流影响,测量精度无法保证;加之其搭载的多为非量测型数码相机,单幅影像的覆盖范围较小,需要多点布设像控点。可见,如何以较少的测量布控点,实现高精度测量是问题的关键,而集成 GPS 全球定位技术和 IMU 惯性测量装置的 POS 辅助航空摄影测量技术,可获取航摄仪的位置和姿态信息,通过 IMU、DGPS 数据的联合后处理,直接测定航摄像片的外方位元素,可减少甚至无需外控点,实现高精度的

航测。可是,因为 GPS 定位、IMU 姿态测量、GPS 与测量仪的空间偏移等误差因素的影响,空中三角测量 POS 数据精度受限,而差分技术可在已知坐标位置上的基准站 GPS 接收机,与无人机上的 GPS 接收机同步观测位置点,并利用误差数值的计算来修正测量数据,可提升三角测量 POS 数据精度,为此,成为现有研究的重点课题。

从研究来看,陈鹏飞等^[1]利用 Inpho 摄影测量软件实测后差分方法,可显著提升无人机摄影测量成果精度,且通过像控点合理布控可在大比例无人机测绘中得到很好的应用效果;张盼兴等^[2]以农地测量为研究对象,使用动态后差

收稿日期:2020-09-18

分处理技术来优化测量精度,通过精度对比,达到了预期要求;刘运明^[3]使用实时差分处理方法,较好的消除了实施监测系统的测量误差,达到了高精度测量需求,且监测效率得到了显著提升,节省了人力、物力;武致宇等^[4]针对监测环境对结果误差的影响,为简化系统配置、提升监测效率,将基于最小二乘拟合的多基准站差分改正法融入自动化监测中,得出其可准确反映多基准站与监测点之间的共性误差,有效提升监测精度。徐红岩^[5]将两种差分方法融合应用在同一区域,通过对比实验,得出实时差分方法无需测量像控点,但因为内业处理软件问题,效率较低;而后差分需布设测控点,生成的航摄影像图的平面误差较小,精度优于实时差分。可见,差分方法具有实时和事后之分,而后差分方法无需在航摄影及基准站之间建构稳定、实时的数据通链,仅需同时进行 GOS 数据观测,基于内业差分数据处理软件解算误差改正值,即可得到高精度的测量数据,受外界干扰较小,应用范围更广,针对此,本文将以后差分方法的技术流程为准,抓住影响 POS 数据精度的关键要素,通过相机时延测量与控制技术、差分处理模块构建及联合平差方法改进,来优化 POS 精度,以为极少或无地面像控点布设条件下高精度测量提供有效支撑。

1 后差分方法优化 POS 数据精度的要点

POS 辅助空中三角测量实则是基于 GPS 和 IMU 的组合,通过测定航摄影仪拍摄瞬时位置和姿态信息,进行联合平差,获取每个控制点像片的 6 个外方位元素^[6]。但是,因为 GPS 定位、IMU 姿态测量、航摄影仪内方位元素量、外方位元素坐标转换等误差的存在,联合平差解算的 POS 数据可能并非真值,据此生成的 DOM 影像的定位精度受限,而采用后差分方法,无需像实时差分那样在用户与基准站之间建立稳定的数据通信链^[7],仅需同时观测记载 GPS 和地面基准站,获取载波相位观测值后,利用内业差分软件即可得出不同误差造成的误差修正值,以优化 POS 数据精度。可见,要在极少或无控制点下利用后差分方法完成 POS 数据精度优化,需要把控以下两点:

1) 为减少地面控制点,获取高精度的航摄位置和姿态信息,可以航线部分替代控制点,可结合测量任务及外业规范要求,设计摄影高度、像片重叠度、航线间隔等航线规划参数。而且,因传输、曝光响应延迟,航摄所得 POS 数据并非指令时刻的信息,需予以纠正。

2) 采用高效的联合平差运算,获取高精度的外方位元素,是优化 POS 数据精度的前提,为此,对比不同的区域网平差方法,择优选取严谨性、精度最优的方法为关键。

2 后差分方法优化 POS 数据精度的方案

2.1 POS 数据的精准获取

1) 相机曝光时刻精准控制方法

为控制相机延迟带来的误差,以提升后差分 POS 数据

的获取精度,引入相机时延测定及控制模块,具体的设计如下:

相机时延测定:后差分 POS 辅助空中三角测量中,因相机曝光时刻与指令发出时刻的不一致,测得的 POS 数据并非指令发出时刻的信息,故而,本文设计一个可测定相机时延参数的十进制发光二极管装置,配设 4.000 000 MHz 石英晶,先后通过 4 分频、2 个 10 分频,分别获得 1.000 000 MHz 频率、10 kHz 频率的方波脉冲,以实现 10 个发光二极管开启控制。进位输出至下一个十进制计数器,各个发光二极管的开启时间间隔为 0.1 ms,共 0.1、1、10 和 100 ms 等 4 级^[8],此时,通过控制相机拍照,便可从相片中读取相机延迟时间。设定相机曝光时刻 T_2 较拍指令时刻 T_1 存在的时延为 $\Delta T = T_2 - T_1$,该值直接影响 POS 数据精度,要使用上述装置达到精密测定的效果,应关注测定装置自身的延迟性,带来的大数进位问题,以规避读数粗差,为此,设计中控制相机时延测定装置启动的指令时刻 T_{10} 。要比指令时刻 T_2 往前推移一个常数 $\Delta T_0 = T_2 - T_{10}$,如此,便可让装置测定的相机时延读数位于十进制的中间位置。

相机曝光时间控制:通常,相机延迟多在 90~140 ms 之间^[9],而要达到无时延或 1 ms 以内的相机同步精度,可布设一个液晶快门于航摄相机镜头前段,并设定控制电压为正、负时,阻挡、允许光线通过液晶快门进入相机,控制电压为 0 时,液晶快门为自由状态,如此,通过预先测定延迟参数,在指令发出时刻的前 0.5 ms 通过控制正负电压,进行相机开闭的调控,如此,通过适时调整相机快门时序中各控制点的时间间隔,便可实现相机曝光时刻与指令时刻的同步精准控制,对应的相机曝光时刻调控的时序如图 1 所示。

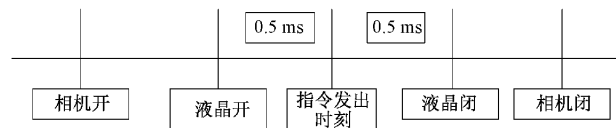


图 1 相机曝光时刻调控的时序图

2) 后差分模块的优化

基于无人机航测仪载荷及空间的局限性,以及专业 RTK 模块的成本限制^[10],测得的外方位线元素精度不佳,影响 POS 数据精度,而为使其优化,需要通过后差分模块,使用载波相位差分方法消除大部分误差,将航测单点定位精度达到厘米甚至是毫米级。但是,问题的关键是后差分方法使用过程中,需同时观测基准站与用户的接收机,采用码伪距和载波相位观测量同时定位,而此间存在接收机噪声、钟误差及多路径效应,为规避这些误差,将采用双差模型,设定地面基准站 K 与 GPS 基准站同步观测卫星 S,并以高度角最大的卫星作为参考卫星,设为 O,与其对应的站间单差观测方程为被差方程,以此构建的码伪距和载波相位双差定位方程各为^[11]:

$$\nabla \Delta \bar{\rho}_{kj}^{so} = \nabla \Delta \rho_{kj}^{so} + (l_{kj}^s - l_{kj}^o) dX + (m_{kj}^s - m_{kj}^o) dY + (n_{kj}^s - n_{kj}^o) dZ + \nabla \Delta \epsilon_1 \quad (1)$$

$$(\Delta L_{kj}^s + \Delta \gamma_{kj} + \Delta N_{kj}^s) \lambda^s - (\Delta L_{kj}^o + \Delta \gamma_{kj} + \Delta N_{kj}^o) \lambda^o = \nabla \Delta \rho_{kj}^{so} + (l_{kj}^s - l_{kj}^o) dX + (m_{kj}^s - m_{kj}^o) dY + (n_{kj}^s - n_{kj}^o) dZ + \nabla \Delta \epsilon_2 \quad (2)$$

式中: $\nabla \Delta \bar{\rho}_{kj}^{so}$ 、 $\nabla \Delta \rho_{kj}^{so}$ 分别为码伪距及空间几何距离的双差, ϵ_1 、 ϵ_2 分别为码伪距、载波相位的观测噪声, l_{kj}^s 、 l_{kj}^o 分别为载波相位及码伪距观测量, γ_{kj} 为载波相位偏差, N_{kj}^s 为整周模糊度, λ^o 为参考卫星载波波长, X 、 Y 、 Z 为定位坐标, d 为单差矩阵, $(l_{kj}^s - l_{kj}^o)$ 、 $(m_{kj}^s - m_{kj}^o)$ 、 $(n_{kj}^s - n_{kj}^o)$ 分别卫星 S 观测方向对 3 个坐标轴的余弦。利用式(1)可解算整周模糊度,使用式(2)在完成固定解计算后便可得高精度的外方位线元素。

据此,研究将以差分固定接比率作为评测指标,测定不同接收天线与后差分处理芯片的组合方式。因 U-blox 公司的 NEO-M8T 精密授时模块,可生成 20 ns 以内的精密参考时钟,配置辅助差分、-157 dBm 信号采集功能的高灵敏接收器^[12],在复杂、大范围的野外航测环境下仍可实现高精度定位与测量,且该芯片可依照任意国际标准提供时间,包含星系间偏移的校正,拥有位置测量与单卫星授时的特性;而 RTK 双频螺旋天线棒 BT-560 可以收发控制旋转的偏振电磁信号,可获得高精度的基站坐标,为此,本文以 NEO-M8T 精密授时芯片与 BT-560 天线组建后差分处理模块,并使用 STM32 单片机将差分的导航信息传输至航摄仪控制器,并依照时间顺序存储相机闪光时刻信号与差分原始数据,如此,通过相机曝光时刻的精准记录,利用在 T_i 、 T_{i+1} 相邻时刻经过差分处理后的 POS 数据之间内插的方法,便可得经过差分处理的位置信息,后差分模块功能原理如图 2 所示,经过测定,以此构建的 POS 数据精度优化的后差分模块,固定解率在 90% 以上,其获取的外方位先元素精度更优。

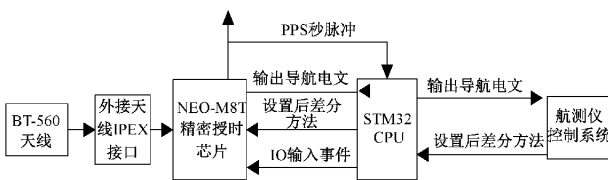


图 2 外方位线元素精度优化的后差分模块

2.2 POS 数据联合平差方法的优化

因以往光束区域网平差需布设大量像控点,才能确保联合平差的精准性,而将 GPS 定位数据引入空中三角测量,构建 GPS 辅助光束法区域网平差方法,通过在测量区域四角设置平高地面控制点,两端布设两排高程控制点,或加非与常规航线垂直的无构架航线,即可在极少或无像控点的情况下实现高精度定位。后差分方法使用上述平差方法建构的误差方程矩阵为^[13]:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_x = \mathbf{B}_x + \mathbf{A}_x \mathbf{t} + \mathbf{S}_s - \mathbf{L}_x \mathbf{E} \\ \mathbf{V}_G = \mathbf{A}_G \mathbf{t} + \mathbf{R}_x + \mathbf{D}_G \mathbf{d}_G - \mathbf{L}_G \mathbf{P}_G \end{cases} \quad (3)$$

式中: \mathbf{V}_x 、 \mathbf{V}_G 各为像控点与 GPS 基准站坐标中的误差改正值向量; x 、 t 分别为待定点中无方坐标、影像外方位元素的未知数增量向量; s 为自检校参数向量; r 为 GPS 偏心分量增量向量, d_G 为 GPS 漂移误差改正值向量, \mathbf{B}_x 、 \mathbf{A}_x 、 \mathbf{S}_s 、 \mathbf{A}_G 、 \mathbf{D}_G 均为相应未知数系数矩阵, \mathbf{L}_x 、 \mathbf{L}_G 、 \mathbf{P}_G 分别为像控点坐标残差向量、GPS 基准站观测值残差向量及权矩阵。

在使用后差分优化 POS 数据精度时,由数码相机参数可知,采用 GPS 辅助光束法区域网平差解算过程,可将 GPS 和 IMU 联合测量的瞬时三维坐标、姿态角元素、像平面中像点坐标作为部分起算数据的近似值,并在联合平差解算过程中将实测的像片角元素、线元素、地面加密点及像控点的三维坐标融入其中^[14],以循环迭代的方式进行运算,也即将每次所得的 POS 数据平差值作为新的 POS 数据起算值参与迭代运算,而后,将每个像片上所用的同名点作为最小单位,并通过求解各像片方向余弦组成的欧勒矩阵、误差方程式系数及残差项,解算平差值后,验证整个 POS 数据精度优化计算过程是否收敛,若误差方程中各未知系数的误差改正值达到最小,则终止迭代计算,即可得到精度最优的 POS 数据。

3 后差分方法优化 POS 数据精度的应用分析

3.1 应用分析方法

针对野外、大范围下地面像控点布设难度、成本的限制,为在极少控制点或无控制点,达到基于高精度的 POS 数据实现高精度的航测目的,鉴于架构航线通过增加多条与测图航线近似垂直的航线,来减少地面像控点的布设方法,为此,研究从是否布设航线及如何布设、是否使用后差分方法、控制点布设位置及数量等因素考量,设定不同的应用方案,通过对比分析方法,实测后差分方法对空中三角测量 POS 数据精度的优化作用及影响因素,具体方案如表 1 所示。

表 1 后差分方法优化 POS 精度的应用方案

控制点布设方案	航线布设	后差分方法	像控点布设位置	像控点布设数量
1	常规	未使用	常规控制点	22
2	非架构	使用	两排平高、中间布点	13
3	非架构	使用	周边、中间布点	12
4	非架构	使用	两排平高	10
5	非架构	使用	周边布点	10
6	非架构	使用	四角、中间	5
7	架构	使用	四角、中间	5
8	架构	使用	四角	4
9	非架构	未使用	两排平高、中间	13

后差分方法优化后的空中三角测量 POS 数据,可用于生成数字正射影像图 DOM,以完成高精度的定位测量,针对此,本文使用精度优化后的 POS 数据,采用 Inpho 软件的“OrthoMaster”导入 POS 数据,利用“正射纠正”处理工具^[15],通过正射区域的重叠度、定义像元大小、输出个数、路径的设置,纠正单张像片并在“OrthoViso”模块中进行单片镶嵌,便可测量区域的 DOM 影像图。而后,在生成的 DOM 图上,选取均匀分布、周围视野开阔、视野内障碍物高度角在 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 之间、距离大功率无线电源发射源及高压输电线 400 m 以上的地物点作为检测点,共选取 45 个检测点,以 DOM 图上各检测点的平面坐标为观测值,以 RTK 实的检测点坐标作为实际值,计算两者差值,以此得到平面位置中误差^[16]:

$$m_s = \sqrt{\frac{\sum(\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2)}{n-1}} \quad (4)$$

式中: n 为参与精度评定的检测点数, ΔX_i 、 ΔY_i 各为第 i 个检测点 X、Y 方向中误差。

根据计算得出的平面位置中误差,便可根据《低空数字航空摄影测量内业规范》(CH/Z 3003-2010)的精度要求,测定以高精度 POS 数据生成的 DOM 成图精度。

3.2 应用结果分析

上述 9 种应用方案下基于后差分优化后的高精度 POS 数据生成的 DOM 图像,所得应用效果如表 2 所示,其平面中误差如图 3 所示。

表 2 后差分方法优化 POS 精度的应用效果

控制点 布设方案	ΔX	ΔY	ms	控制点 数量	检测点 数量
1	0.128	0.121	0.189	22	46
2	0.221	0.265	0.331	13	46
3	0.210	0.222	0.298	12	46
4	0.252	0.275	0.358	10	46
5	0.231	0.241	0.328	10	46
6	0.271	0.285	0.395	5	46
7	0.284	0.311	0.399	5	46
8	0.298	0.345	0.455	4	46
9	0.281	0.308	0.415	13	46

由图 3 可知,通过方案 2、9 对比可知,同等条件下,使用后差分的方案 2 因可优化 POS 数据精度,生成的 DOM 精度优于未使用后差分的方案 9,且通过 9 种方案的综合对比,采用后差分方法优化空中三角测量 POS 数据精度后,即便以较少的像控点进行航测,也即仅 4 个像控点时,其生成的 DOM 成图精度仍然达到了 1:1 000 比例尺度测量精度要求,据此验证了后差分方法在空中三角测量 POS 数据优化中发挥着重要的作用,是值得推广应用的。通过方案 6、7 对比可知,同等条件架设航线的方案 7 DOM 成图

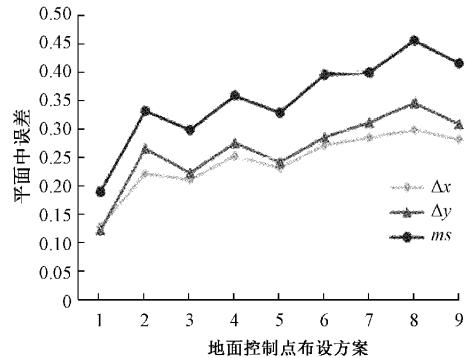


图 3 不同方案下后差分优化 POS 的平面中误差

精度更优,尤其在复杂、大范围的野外航测环境中,基于成本和效率的考量,也应采用无架构航线模式及像控点布设。

4 结 论

低空无人机空中三角测量因融合 GPS 和 IMU 实时定位、跟踪测量的优势,生成的 POS 数据精度在 DOM 成图定位中发挥重要作用。但限于多像控点布设耗时耗力,而少点或无点又会影响 POS 数据精度,为化解两者矛盾,一种低成本、高效额 POS 数据精度优化方法势在必行。而后差分方法正好迎合该需求,但面临数据采集实时性差、联合平差结算误差大的技术难点,针对此,上述研究应用十进位发光二极管装置测定相机时延参数,并据此,在指令发出前提前调控相机开闭,以优化数据采集的实时性;同时,利用循环迭代的计算方法,解算 POS 数据平方差的最优值,以解决 GPS 定位、IMU 姿态测量、航摄仪内方位元素量、外方位元素坐标转换等误差的影响。该研究从“前后端”优化 POS 数据源,以确保后差分的高精准性,但相机时延参数的测定,联合平差法的迭代计算,会增加一定的计算量,此是未来研究应予以补足和完善的。

参考文献

- [1] 陈鹏飞,胡海峰,廉旭刚,等.后差分技术及像控点密度对无人机摄影测量精度影响研究[J].测绘通报,2017(11):144-147.
- [2] 张盼兴,柳家友.小型无人机 GNSS 动态后差分技术在农村地籍测量中的应用[J].浙江农业科学,2019,60(7):1152-1153,1158.
- [3] 刘运明.自动极坐标实时差分监测技术在地铁隧道结构变形监测中的应用[J].测绘通报,2016(1):99-103.
- [4] 武致宇,张献州,黎冶,等.最小二乘拟合的多基准站实时差分改正法[J].测绘科学,2019,44(9):29-34.
- [5] 徐红岩.基于 DGPS 技术的低空摄影测量应用研究[D].赣州:江西理工大学,2015.
- [6] 贾鑫,杨树文,张志华,等.搭载 POS 数据的无人机影像提高定位精度的方法[J].遥感信息,2019,34(4):92-96.
- [7] 马松辉,芦永超,刘可佳,等.基于小型无人机的高精度

- 天线测试方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 36-42.
- [8] 袁三明, 袁崇政, 朱兰艳. 高原山区天狼星无人机航测精度分析[J]. 电子测量技术, 2019, 42(8): 88-92.
- [9] 薛武, 张永生, 王涛, 等. 无人直升机面阵影像高精度对地定位[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(2): 246-253.
- [10] 杨德芳, 许伟, 万玉辉, 等. 机载高动态 GPS 单基站事后差分解算精度分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(12): 75-79, 83.
- [11] 朱庄生, 袁学忠. 基于单目视觉的位置姿态测量系统精度检校方法[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(5): 654-659, 664.
- [12] 韩建鹏, 孙颖宏. 中画幅量测相机与高精度 POS 系统的集成与应用[J]. 地理空间信息, 2018, 16(6): 83-86, 9.
- [13] 樊伊君, 张启超. 无人机航测图像匹配关键技术研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(10): 25-28.
- [14] 喻静敏, 钟良. 无人机遥感在地面目标变化监测中的应用研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(9): 95-98.
- [15] 陈康, 张荷芳, 王静. 提高 GPS 数据精度的实验分析与应用研究[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(9): 63-67.
- [16] 周阳林, 李广云, 王力, 等. 基于传感器联合测量的车载 POS 精度检测系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 806-812.

作者简介

朱杰, 测绘工程师, 主要研究方向为测绘工程。

E-mail: gaoyanfang1130@163.com