

影响机载激光扫描测高精度的系统误差分析

刘经南¹ 张小红² 李征航²

(1 武汉大学校长办公室, 武汉市珞珈山, 430072)

(2 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要: 简要介绍了机载激光扫描测高技术的系统组成和发展现状。通过坐标转换技术建立起机载激光扫描对地定位的基本几何关系, 并从这些几何关系出发, 着重分析了动态偏心改正及动态时效误差对机载激光测高精度的影响, 对不同的误差源如何影响定位结果的精度进行了讨论, 最后给出模拟计算结果, 得出了一些有益的结论。

关键词: 机载激光扫描测高; 动态偏心改正; 动态时延; 误差分析; 模拟计算

中图法分类号: P228.42; P225.2

随着相关技术的发展以及社会需求的不断扩大, 机载激光扫描测高技术已成为一种新兴的高新技术。美国 HA RC 的激光雷达地形测量系统, 1994 年进行飞行试验, 飞行高度 600m, 最终产品的飞行高度预计为 1 600~1 700m。加拿大卡尔加里大学 1998 年进行了机载激光扫描系统的集成与试验, 通过对所购得的激光扫描仪与 GPS、INS 和数据通讯设备的集成, 实现了一个机载激光扫描三维数据获取系统, 并进行了一定规模的试验, 取得了理想结果。荷兰测量部门自 1998 年就开始从事用激光扫描测量技术提取地形信息的研究; 日本东京大学 1999 年进行了地面固定激光扫描系统的集成与试验; 我国学者李树楷利用 GPS、INS、扫描激光测距和扫描成像仪进行集成而得到一套全新的航空遥感系统—机载三维成像仪, 并于 1996 年完成该系统原理样机的研制^[1]。国外一些商业公司已推出了类似的激光测高系统和地面激光测量系统, 比较成熟的有瑞典的 Top-Eye 机载系统、德国的 TopoScan 系统、加拿大 Optech 公司的 ALTM1020GG 系统、美国 NASA 的 LVIS 系统和 Lidar 系统等^[2~4]。我国在地面激光测量系统方面已有成功应用的例子^[5]。

由于机载激光扫描系统是由激光测距仪、高精度的惯性导航系统(INS)和卫星定位系统(GNSS)三者的高度集成, 系统本身必将受到来自激光测距、姿态、飞行器位置等各种误差源的影

响。李树楷、刘少创、尤红建、徐逢亮等从摄影测量原理中的共线方程导出了机载三维成像仪系统的几何模型, 并对影响定位精度的主要误差源进行了一定的分析^[1]; 刘基余定性分析了影响机载激光测深精度的附设误差和海水深度的测量误差两大测深误差源^[6]; 国外也有不少学者对影响机载激光扫描测量精度的系统误差进行了分析^[2,7], 但以上文献都没有讨论动态偏心改正及动态时效误差等问题。黄谟涛等根据多波束和机载激光测深的特点, 全面推导了条带式深度测量测点位置归算的严密计算公式及其相应的精度估算公式^[8]。

1 数学模型

1.1 惯性平台参考水平直角坐标系

惯性平台参考水平直角坐标系, 随飞机一起作平移运动, 但坐标在空间的指向保持不变。为了更为简便, 坐标原点位于 GPS 天线相位中心, X 轴指向北, Y 轴指向东, Z 轴垂直向下, 见图 1。

1.2 激光扫描坐标系

选择激光测距系统中激光发射(接收)参考点作为该坐标系的原点 O , x 轴指向飞机飞行方向, y 轴指向右机翼, z 轴向下且 $O-xyz$ 构成右手系, 如图 2 所示。该坐标系随载体的运动(包括仰俯、侧滚和航向变化)而运动。

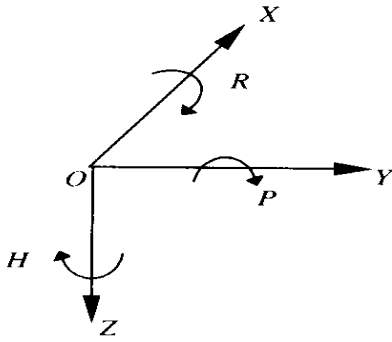


图1 惯性平台参考水平直角坐标系示意图

Fig. 1 Reference Frame of IMU Platform

那么, 激光脚点 P 在激光扫描坐标系中的坐标为:

$$\begin{cases} x_p = -S \sin \theta \sin \beta \\ y_p = S \sin \theta \cos \beta \\ z_p = S \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中, θ 为扫描角; β 为扫描方位角(对于圆锥扫描方式, 以 y 轴方向为起算方向), 当 $\beta=0$ 时为线扫描方式。

1.3 激光发射(接收)参考点到惯性平台中心的偏心改正(动态)

每次作业时, GPS 天线相位中心同激光测距系统中激光发射(接收)参考点(激光扫描坐标系原点)偏心改正量(Δx , Δy , Δz)在激光扫描坐标系中是个常量(可事先测定), 但该偏心改正量在惯性平台参考水平直角坐标系中的坐标分量(ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0)随着飞机姿态的变化而改变。假设飞机的姿态参数分别为方位角 H (heading)、仰俯角 P (pitch)、侧滚角 R (rolling)(如图1所示), 利用坐标旋转矩阵, 按国际标准转角系统取用 X 轴为主轴, 且各转角的正方向如图1所示(右手系), 那么, 激光测距系统中激光发射(接收)参考点在惯性平台参考水平直角坐标系中的偏移分量为(动态偏心改正):

展开得:

$$R(H, P, R) = \begin{bmatrix} \cos H \cos P & -\sin H \cos R + \cos H \sin P \sin R & \sin H \sin R + \cos H \sin P \cos R \\ \sin H \cos P & \cos H \cos R + \sin H \sin P \sin R & \sin H \sin P \cos R - \cos H \sin R \\ -\sin P & \cos P \sin R & \cos P \cos R \end{bmatrix}$$

令
$$R(H, P, R) = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}$$

式中, $a_1 = \cos H \cos P$

$$a_2 = -\sin H \cos R + \cos H \sin P \sin R$$

$$a_3 = \sin H \sin R + \cos H \sin P \cos R$$

$$b_1 = \sin H \cos P$$

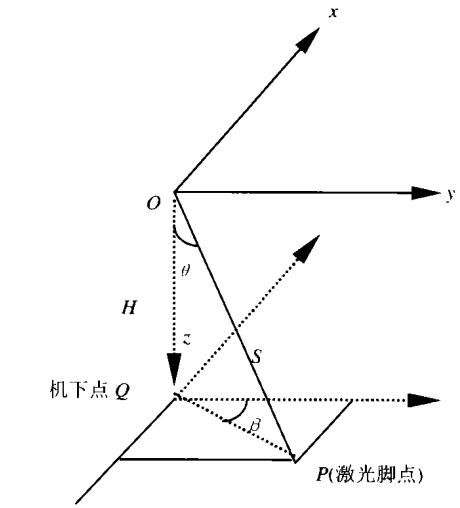


图2 激光扫描坐标系及对地定位示意图

Fig. 2 Airborne Laser Scanning Sub-system and the Laser Footprint

$$\begin{bmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} = R(H, P, R) \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (2)$$

激光脚点 P 在惯性平台参考水平直角坐标系中的坐标为:

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} + R(H, P, R) \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $R(H, P, R) = R_Z(H)R_Y(P)R_X(R)$

$$R_X(R) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R & -\sin R \\ 0 & \sin R & \cos R \end{bmatrix}$$

$$R_Y(P) = \begin{bmatrix} \cos P & 0 & \sin P \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin P & 0 & \cos P \end{bmatrix}$$

$$R_Z(H) = \begin{bmatrix} \cos H & -\sin H & 0 \\ \sin H & \cos H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$b_2 = \cos H \cos R + \sin H \sin P \sin R$$

$$b_3 = \sin H \sin P \cos R - \cos H \sin R$$

$$c_1 = -\sin P; c_2 = \cos P \sin R$$

$$c_3 = \cos P \cos R$$

$$\begin{bmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \Delta x + a_2 \Delta y + a_3 \Delta z \\ b_1 \Delta x + b_2 \Delta y + b_3 \Delta z \\ c_1 \Delta x + c_2 \Delta y + c_3 \Delta z \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1\Delta x + a_2\Delta y + a_3\Delta z \\ b_1\Delta x + b_2\Delta y + b_3\Delta z \\ c_1\Delta x + c_2\Delta y + c_3\Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 x_p + a_2 y_p + a_3 z_p \\ b_1 x_p + b_2 y_p + b_3 z_p \\ c_1 x_p + c_2 y_p + c_3 z_p \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式(1)代入式(5)得: $X_P = a_1(\Delta x - S \sin \theta \sin \beta) + a_2(\Delta y + S \sin \theta \cos \beta) + a_3(\Delta z + S \cos \theta)$
 $Y_P = b_1(\Delta x - S \sin \theta \sin \beta) + b_2(\Delta y + S \sin \theta \cos \beta) + b_3(\Delta z + S \cos \theta)$ (6)
 $Z_P = c_1(\Delta x - S \sin \theta \sin \beta) + c_2(\Delta y + S \sin \theta \cos \beta) + c_3(\Delta z + S \cos \theta)$

取 $\beta = 0$, 即有线扫描方程: $X_P = a_1\Delta x + a_2\Delta y + a_3\Delta z + a_2S \sin \theta + a_3S \cos \theta$
 $Y_P = b_1\Delta x + b_2\Delta y + b_3\Delta z + b_2S \sin \theta + b_3S \cos \theta$ (7)
 $Z_P = c_1\Delta x + c_2\Delta y + c_3\Delta z + c_2S \sin \theta + c_3S \cos \theta$

1.4 地方坐标系

地方坐标系可根据具体情况来定, 比如可选择在测区的中心, X 、 Y 、 Z 三轴的分别平行于惯性平台参考水平直角坐标系的 3 轴。激光脚点 P 在惯性平台参考水平直角坐标系中的坐标到地方坐标系的转换关系为(只有平移没有旋转):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{Local}} = \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix}_{\text{Airborne}} + \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix}_{\text{Local}} \quad (8)$$

式中, (X_G, Y_G, Z_G) 为 GPS 天线相位中心在当地坐标系下的坐标。

1.5 WGS-84 坐标系

WGS-84 坐标系是全球定位系统中采用的世界大地坐标系。

2 激光测高误差源

2.1 激光测距误差

2.1.1 激光脉冲装置的仪器误差

主要包括传感器激光信号发射与接收不平行误差, 激光脉冲信号传播时间的测量误差, 反光镜的旋转、震动误差, 脉冲零点误差等。

2.1.2 大气折射误差

激光在穿透大气时, 同 GPS 信号一样也要受到大气(对流层)折射误差的影响, 其影响程度取决于激光脉冲的波长。同一种信号的大气折射误差主要与气温、气压和大气湿度有关。激光脉冲波长大约为 $1\mu\text{m}$, 而 GPS 载波信号的波长约为 2dm , 因此, 同 GPS 信号相比, 激光脉冲信号受大气折射的影响要小得多; 天顶方向对流层延迟改正的绝对量只有几个 mm , 同目前激光测高的精度相比也要小得多。考虑简单的模型改正后, 残余误差可以忽略不计。

2.1.3 同反射面有关的误差

激光脉冲信号发射到地面时, 由于地表物理特征的不同而产生不同的反射。当信号发生漫反

射时大量反射信号被接收, 会形成较大的接收噪声; 当信号发射到光滑物体表面便形成镜面反射, 可能会造成激光测距信号“丢失”; 另外, 有的信号可能经几次反射后反射回去, 这样测定的时间延迟不能代表真正的时间延迟。

激光测高精度还与地面粗糙程度、地面坡度、地面物体的干扰(如植被)等有关。另外, 被水域覆盖的地方, 红外光大部分被吸收, 只有少量被反射, 如果碰到静止水面就形成镜面反射, 信号反射不回去; 地表不连续以及移动物体, 如行人、车辆、动物等都会影响激光测高的精度。

2.2 GPS 定位误差

GPS 定位误差主要包括卫星轨道误差, 卫星钟差, 接收机钟差, 大气延迟误差, 多路径效应, 相位中心不稳定, 卫星星座, 观测噪声, 整周模糊度求解正确与否等。

2.3 INS 姿态测量误差

主要包括设备安置误差、加速度计常数误差、加速度计比例误差、陀螺仪漂移、测量噪声、轴承间的非正交性等。

2.4 动态时延误差

动态时延误差是由于定位系统和测距系统的数据采样率不一致所引起的。目前定位设备的数据更新率一般在零点几秒到 1s 、 2s 之间, 而激光脉冲的重复频率则达到几百甚至几千 Hz (国外)。由此可见, 机载激光测量系统普遍存在着不同程度的时延效应, 这种效应对高精度条带式测量成果的影响有时是需要考虑的。动态时延误差包含两部分: ①由于激光测距和 GPS 定位数据采集率不同引起的时延改正; ②由于飞机的垂直运动分量引起的附加改正(比前者小)。假设飞机飞行高度为 1000m , 最大扫描角为 30° , 那么激光往返的最大路径为: $S = 2 \times 1000 \times 2 / 1.732 \approx 2309\text{m}$, 传播时间为 $t = S / c \approx 7.7\mu\text{s}$ 。设飞机飞行速度为 100m/s , 那么飞机在这段时间内的位置变化为 $\Delta P = 0.77\text{mm}$ 。由此可见, 动态时延误差在机载

激光测高中可以不予考虑。

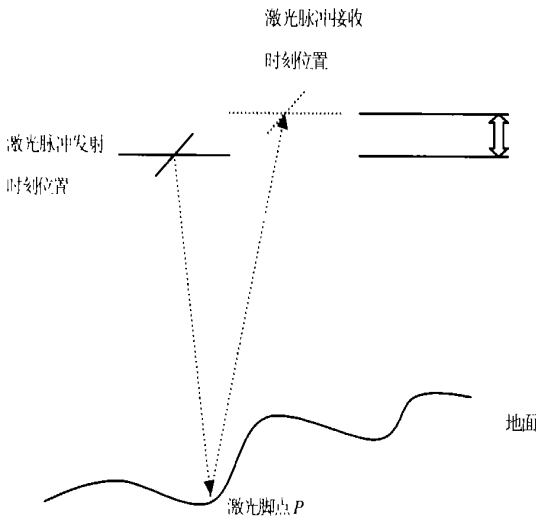


图3 动态时延误差示意图

Fig. 3 Kinematic Time Delay

2.5 系统集成综合误差

系统集成综合误差主要包括激光脉冲感应参考中心与GPS天线相位中心偏心向量的测定误差、位置内插误差、时间同步误差、地面参考站间的位置误差、坐标系间的转换误差、滤波模型误差等。

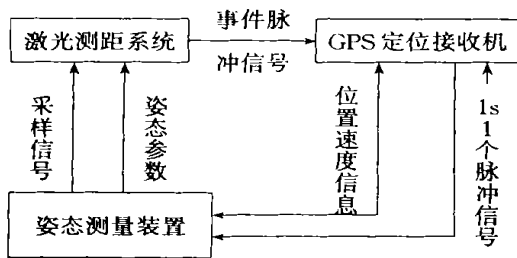


图4 系统集成

Fig. 4 Systematic Integration

3 激光测高误差传播及精度估计

假设各项误差相互独立的情况下,由式(6)和式(8)根据误差传播律可以得到:

$$\begin{aligned}
 m_X^2 &= a_{1,1}^2 m_{X_G}^2 + a_{1,2}^2 m_{Y_G}^2 + a_{1,3}^2 m_{Z_G}^2 + a_{1,4}^2 m_{\Delta_x}^2 + \\
 & a_{1,5}^2 m_{\Delta_y}^2 + a_{1,6}^2 m_{\Delta_z}^2 + a_{1,7}^2 m_S^2 + a_{1,8}^2 m_{\theta}^2 + \\
 & a_{1,9}^2 m_{\beta}^2 + a_{1,10}^2 m_P^2 + a_{1,11}^2 m_H^2 + a_{1,12}^2 m_R^2 \\
 m_Y^2 &= a_{2,1}^2 m_{X_G}^2 + a_{2,2}^2 m_{Y_G}^2 + a_{2,3}^2 m_{Z_G}^2 + a_{2,4}^2 m_{\Delta_x}^2 + \\
 & a_{2,5}^2 m_{\Delta_y}^2 + a_{2,6}^2 m_{\Delta_z}^2 + a_{2,7}^2 m_S^2 + a_{2,8}^2 m_{\theta}^2 + \\
 & a_{2,9}^2 m_{\beta}^2 + a_{2,10}^2 m_P^2 + a_{2,11}^2 m_H^2 + a_{2,12}^2 m_R^2 \\
 m_Z^2 &= a_{3,1}^2 m_{X_G}^2 + a_{3,2}^2 m_{Y_G}^2 + a_{3,3}^2 m_{Z_G}^2 + a_{3,4}^2 m_{\Delta_x}^2 + \\
 & a_{3,5}^2 m_{\Delta_y}^2 + a_{3,6}^2 m_{\Delta_z}^2 + a_{3,7}^2 m_S^2 + a_{3,8}^2 m_{\theta}^2 +
 \end{aligned}$$

$$a_{3,9}^2 m_{\beta}^2 + a_{3,10}^2 m_P^2 + a_{3,11}^2 m_H^2 + a_{3,12}^2 m_R^2$$

式中, m_X^2 、 m_Y^2 、 m_Z^2 分别为激光脚点P在地方坐标系X, Y, Z轴方向的中误差; $m_{X_G}^2$ 、 $m_{Y_G}^2$ 、 $m_{Z_G}^2$ 分别为GPS定位分量中误差; $m_{\Delta_x}^2$ 、 $m_{\Delta_y}^2$ 、 $m_{\Delta_z}^2$ 分别为偏心量测定中误差; m_{θ}^2 、 m_{β}^2 、 m_S^2 分别为扫描角、扫描方位角和激光测距中误差; m_P^2 、 m_H^2 、 m_R^2 分别为姿态参数测量中误差; $a_{i,j}^2$ ($i=1, 2, 3$; $j=1, 2, 3, \dots, 12$) 分别为各自变量的一阶偏导数系数(具体表达式略)。

4 误差估计的模拟计算与分析

衡量激光测距点定位精度的指标 m_X^2 、 m_Y^2 、 m_Z^2 是由GPS的定位精度 $m_{X_G}^2$ 、 $m_{Y_G}^2$ 、 $m_{Z_G}^2$ 、姿态测量精度 m_P^2 、 m_H^2 、 m_R^2 、激光测距扫描角精度 m_{θ}^2 、 m_{β}^2 、 m_S^2 和偏心量测定精度 $m_{\Delta_x}^2$ 、 $m_{\Delta_y}^2$ 、 $m_{\Delta_z}^2$ 共同决定的, 每项精度指标的下降, 都会导致系统定位精度的下降。为简便实用起见, 下面就结合几种特殊状态, 对不同误差源如何影响测高定位的精度进行具体分析和模拟计算。

1) 由式(7)可知: Z方向的坐标分量 Z_P 与飞机的航向无关, 航向方位角的测定误差不会影响Z方向的精度。

2) 假定 $P=0$, $R=0$, $H=0$, $\beta=0$, 且姿态误差为0, 那么有:

$$\begin{cases}
 X_p = \Delta x \\
 Y_p = \Delta y + S \sin \theta \\
 Z_p = \Delta z + S \cos \theta
 \end{cases} \quad (9)$$

此时偏心量测定误差对地面激光点坐标分量的影响分别为:

$$\delta X = \delta \Delta x, \delta Y = \delta \Delta y, \delta Z = \delta \Delta z$$

激光测距误差对地面激光点坐标分量的影响分别为:

$$\delta X = 0, \delta Y = \delta S \sin \theta, \delta Z = \delta S \cos \theta$$

取 $\delta S = 0.08m$, 最大扫描角取 30° , 可得到激光测距误差对地面激光点坐标分量Y、Z方向影响的变化曲线图, 如图5所示。

此时, 激光测距误差对X分量没有影响, 对Y分量的影响随着扫描角的增大而增大, 对Z分量的影响随着扫描角的增大而减小。

激光扫描角测定误差对地面激光点坐标分量的影响分别为:

$$\delta X = 0, \delta Y = H \delta \theta, \delta Z = -H \tan \theta \cdot \delta \theta$$

此时, 激光扫描角测定误差对X分量没有影响,

对 Y 分量的影响随着飞行高度的增大而增大, 对 Z 分量的影响对于相同飞行高度随着扫描角的增大而增大。

3) 假定 $P=0, R=0, H=0, \beta=0$, 姿态误差分别为 $\delta H, \delta R, \delta P$ (微小量), 不考虑测距误差和扫描角的量测误差, 那么有:

$$\begin{aligned}
 a_1 &\approx 1, a_2 \approx -\delta H + \delta P \delta R, a_3 \approx \delta H \delta R + \delta P, \\
 b_1 &\approx \delta H, b_2 \approx 1 + \delta H \delta P \delta R, b_3 \approx \delta H \delta P - \delta R, \\
 c_1 &\approx -\delta P, c_2 \approx \delta R, c_3 \approx 1 \\
 X_p &= \Delta x + (\delta P \delta R - \delta H)(\Delta y + S \sin \theta) + \\
 &\quad (\delta H \delta R + \delta P)(\Delta z + S \cos \theta) \\
 Y_p &= \delta H \Delta x + (1 + \delta P \delta R \delta H)(\Delta y + \\
 &\quad S \sin \theta) + (\delta H \delta P - \delta R)(\Delta z + S \cos \theta) \\
 Z_p &= -\delta P \Delta x + \delta R(\Delta y + S \sin \theta) + \\
 &\quad (\Delta z + S \cos \theta)
 \end{aligned} \tag{10}$$

假定 $\delta P = \delta R = \delta H = 0.03^\circ$, $\delta P, \delta R, \delta H$ 三者的组合是一个微小量, 那么上式可写为:

$$\begin{aligned}
 X_p &\approx \Delta x + (\delta P \delta R - \delta H) S \sin \theta + \\
 &\quad (\delta H \delta R + \delta P) S \cos \theta \\
 Y_p &\approx \Delta y + (1 + \delta P \delta R \delta H) S \sin \theta + \\
 &\quad (\delta H \delta P - \delta R) S \cos \theta \\
 Z_p &\approx \Delta z + \delta R S \sin \theta + S \cos \theta
 \end{aligned} \tag{11}$$

式(11)减式(9), 得此时姿态误差对地面激光点坐标分量的影响为:

$$\begin{aligned}
 \delta X_p &\approx (\delta P \delta R - \delta H) H \tan \theta + \\
 &\quad (\delta H \delta R + \delta P) H \\
 \delta Y_p &\approx \delta P \delta R \delta H H \tan \theta + \\
 &\quad (\delta H \delta P - \delta R) H \\
 \delta Z_p &\approx \delta R H \tan \theta
 \end{aligned} \tag{12}$$

将相应变量的模拟值代入上式进行模拟计算, 其结果见表 1 所示。

计算结果表明, 随着飞行高度的增加, 姿态误差对地面激光点坐标的影响逐渐增大; 随着扫描角的增大, 姿态误差对地面激光点坐标的影响逐渐变大, 高程方向的精度要比平面精度高。

4) 如果飞机的姿态角较大时, 比如取 $P=10, R=10, H=30$, 姿态误差分别为 $\delta H, \delta R, \delta P$ (微小量), $H=400\text{m}$, 其他条件与步骤 2) 相同, 进行相同的模拟计算, 结果如图 6 所示。

一般地, 当组成系统的各个传感器均具有较高的精度时, 系统的定位误差较小, 而且变化幅度也较小; 反之, 当组成系统的各个传感器的精度较差时, 系统的定位误差增大, 而且变化幅度也增大。由式(8)可知, GPS 的定位精度线性地影响

表 1 姿态误差对地面激光点坐标的影响

Tab. 1 Attitude Error Influence on Footprint Coordinates

飞行高度/m	扫描角/ $^\circ$	姿态误差/ $^\circ$	$\delta X_p/\text{m}$	$\delta Y_p/\text{m}$	$\delta Z_p/\text{m}$
400	0	$\delta P = \delta R = \delta H = 0.03$	0.21	0.21	0.00
	-15	$\delta P = \delta R = \delta H = 0.03$	0.26	0.21	0.06
	-30	$\delta P = \delta R = \delta H = 0.03$	0.33	0.21	0.12
1 000	0	$\delta P = \delta R = \delta H = 0.03$	0.52	0.52	0.00
	-15	$\delta P = \delta R = \delta H = 0.03$	0.66	0.52	0.14
	-30	$\delta P = \delta R = \delta H = 0.03$	0.83	0.52	0.30

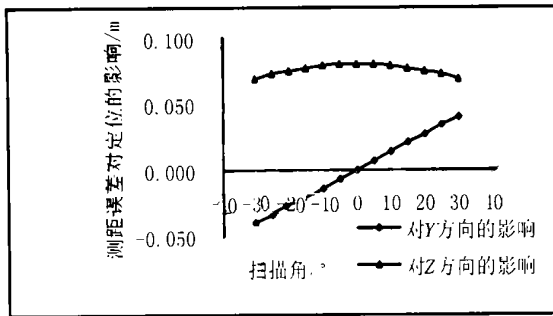


图 5 测距误差对地面激光点坐标分量 Y, Z 方向影响的变化曲线图

Fig. 5 Ranging Error Influence on Footprint Coordinates

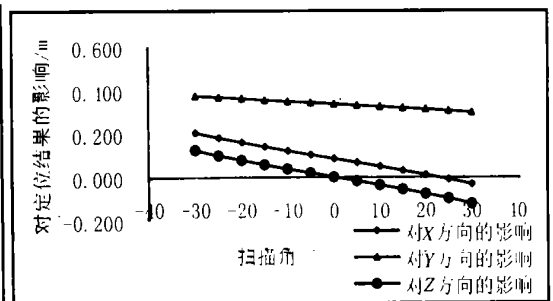


图 6 姿态误差对地面激光点坐标分量 X, Y, Z 方向影响的变化曲线图

Fig. 6 Plots of Attitude Error Influence on Footprint Coordinate Vector

测高定位的精度。在 $m_{X_G}^2$ 、 $m_{Y_G}^2$ 、 $m_{Z_G}^2$ 、 m_P^2 、 m_H^2 、 m_R^2 、 $m_{\Delta_x}^2$ 、 $m_{\Delta_y}^2$ 、 $m_{\Delta_z}^2$ 、 m_{θ}^2 、 m_{β}^2 、 m_S^2 保持不变的情况下,定位精度还与飞行高度、姿态参数的大小、扫描角的大小有关。通常情况下,各种误差可能同时发生,它们之间又具有一定的相关性。各种误差对定位结果的影响并没有一成不变的规律性,对于具体情况还应作具体分析。

5 结 语

激光测高的精度与诸多因素有关。平坦光滑的硬物体表面,如沙土、混凝土表面测高的精度较好;非强反射物体如植被等,测高精度较差;倾斜表面激光束斑中心与周围的高程值会有差异;由 WGS-84 坐标转到地方坐标时,不同的转换方法得到的结果也会有微小的差异;由大地高求正常高时大地水准面的精度也会影响最终结果的精度;地面激光反射点坐标由一个地面参考站计算时精度较好;测区中有几个参考站时,重叠区域地面激光反射点坐标的精度还取决于参考站间坐标的相对位置精度;参考站间坐标误差会降低地面激光点坐标的精度。目前,激光测高的绝对精度可达 15cm;相对精度能达到 5cm。平面位置的绝对精度主要取决于飞行高度(平面位置精度约为飞行高度的 1/1 000)等参数,通常为 dm 级到 m 级的精度。在影响机载激光对地定位精度的各因素中,影响最大的是 GPS 定位精度的高低。如果能优化飞行作业,并提高 GPS 的定位精度,在正常情况下垂直方向精度都能达到 7~8cm 的水平。随着人们认识的不断加深,如果采取一定的模型或方法去模拟或削弱这些误差的影响,其精度指标还有望得到进一步的提高。

参 考 文 献

- 1 李树楷,薛永祺. 高效三维遥感集成技术系统. 北京: 科学出版社, 2000
- 2 Ackermann F. Airborne Laser Scanning—Present Status and Future Expectations. ISPRS, 1999, 54(2/3): 64~67
- 3 Baltsavias E P. Airborne Laser Scanning; Existing Systems and Firms and Other Resources. ISPRS, 1999, 54(2/3): 164~198
- 4 Wehr A, Lohr U. Airborne Laser Scanning—an Introduction and Overview. ISPRS, 1999, 54(2/3): 68~82
- 5 李清泉,李必军,陈静. 激光雷达测量技术及其应用研究. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(5): 387~392
- 6 刘基余,李松. 机载激光测深系统测深误差源的研究. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(6): 491~495
- 7 Toni S. Modeling and Recovering Systematic Errors in Airborne Laser Scanners. OEEPE Workshop on Airborne Laser Scanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models Sweden, 2001
- 8 黄涛涛,翟国君,谢锡君,等. 多波束和机载激光测深位置归算及载体姿态影响研究. 测绘学报, 2000, 29(1): 82~89
- 9 王之卓. 摄影测量原理. 北京: 测绘出版社, 1979
- 10 Krabill W, Abdalati W, Frederick E, et al. Greenland Ice Sheet: High-Elevation Balance and Peripheral Thinning. Science, 2000, 289: 428~430
- 11 Baltsavias E P. Airborne Laser Scanning; Basic Relations and Formulas. ISPRS, 1999, 54(2~3): 199~214

作者简介:刘经南,教授,博士生导师,中国工程院院士。现主要从事空间大地测量和地球动力学研究。代表成果:国家高精度 GPS 数据处理理论与方案;GPS 卫星定位处理综合软件;WADGPS 数据处理青藏高原地壳运动与形变的 GPS 研究等。
E-mail: jnliu@wtusm.edu.cn

Analysis of Systematic Error Influencing the Accuracy of Airborne Laser Scanning Altimetry

LIU Jingnan¹ ZHANG Xiaohong² LI Zhenghang²

(1 Presidential Secretariat, Wuhan University, Luoja Hill, Wuhan, China 430072)

(2 School of Gedy and Geomatics Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China 430079)

Abstract: In this paper the error sources related to the laser instrument, GPS, and INS are analyzed in details. Several coordinate systems used in airborne laser scanning are set up, and then the basic formula of the system is given. This paper emphasizes on discussing the kinematic offset correction between GPS antenna phase center and laser pulse fired point. And kinematic time delay influence on laser foot print position, the ranging errors, positioning errors, attitude errors and inte-

gration errors of the system are also explored. Finally, the result shows that the kinematic time delay can be neglected in comparison with other errors. The accuracy of the coordinates is not only influenced by the amplitude of the error, but also controlled by the flight height, scanning angle amplitude and attitude magnitude.

Key words: airborne laser scanning altimetry; kinematic offset correction; kinematic time delay; error analysis; imitation calculation

About the author: LIU Jingnan, professor, Ph D supervisor, member of Chinese Academy of Engineering. He is mainly engaged in spatial geodesy and Geodynamics. His typical achievements are the theory and scheme of high precision GPS data processing in China; the comprehensive software of GPS satellite positioning processing; the software of WADGPS data processing; monitoring the crustal movement and deformation of Qinghai-Tibet Plateau with GPS.

E-mail: jnliu@wtusm.edu.cn

《武汉大学学报·信息科学版》征稿简则

本刊是由武汉大学主办、国内外公开发行的专业学术期刊,SCI、EI、PKJ等国际著名检索系统均收录本刊发表的论文。为进一步提高刊登论文的代表性,发挥本刊在国内外的学术辐射优势,特面向国内外公开征稿。

1. 稿件内容:本刊主要刊登有关摄影测量、遥感、大地测量、工程测量、地图学、物理大地测量、地球动力学、图形图像学、地理信息系统、测绘仪器、计算机理论及应用、光电工程、通讯技术及电子信息工程、资源与环境等相关学科的学术论文,稿件要求具有较高的学术水平或重大应用价值。所有来稿文责自负。

2. 稿件要求:来稿应符合科技论文著作要求,论点明确,论证严谨,内容创新,数据可靠,方法科学,文字通达、简洁,字数一般在8000字以内。来稿应采用法定计量单位,采用国家有关出版标准,附300字以内的中文摘要和1000单词左右的英文摘要,并附有中英文关键词。摘要要有自含性,要能反映论文的核心内容。作者署名应符合著作权法规定,并附第一作者简介(中英文)、E-mail、通讯方式及所有作者的详细地址(中英文)。基金资助论文应注明基金名称、项目编号。

3. 投稿要求:所有来稿应书写工整,交磁盘者(应转为纯文本格式)同时附打印稿;图表、公式应清楚,易混淆的字符应注明;所附照片应符合制版要求;参考文献著录内容齐全,格式符合有关标准,并按引用的先后顺序于文中标出;不准一稿两投。一经投稿,视为作者授权编辑部可作不影响作者论点的必要文字加工。

4. 鉴于本刊已整体加入《中国学术期刊(光盘版)》、《中文科技期刊数据库》及入网“万方数据(ChinaInfo)系统科技期刊群”,若无特别声明,所有投稿视为作者同意在本刊出版印刷版的同时授权出版光盘版及进入因特网。

5. 来稿经本刊组织的同行专家评议、审查同意刊登后,将酌收版面费。一经刊用,即付稿酬。来稿一般不退。对于投稿三个月后无答复的稿件,作者可以查询。

6. 本刊编辑部地址:武汉市珞喻路129号,武汉大学(测绘校区)本刊编辑部,邮编430079,电话(027)87885922转2465。

E-mail: journal@wtusm.edu.cn;

http://www.wtusm.edu.cn; http://chinainfo.gov.cn/periodical