

基于正交化实验对影响机载激光雷达测量精度的工作参数进行最优化设计

王建军

(¹ 山东理工大学机械工程学院测控系, 山东 淄博 255049)
(² 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要 机载激光雷达三维成像技术中对工作参数的设置非常重要,其关系到机载激光雷达测量精度的高低。为了获得机载激光雷达工作参数的最优设置值,推导了机载激光雷达扫描激光脚点的三维坐标误差,进行了误差因素分析,并确定了影响机载激光雷达激光脚点测量精度的各个工作参数。基于正交化实验设计,对每个工作参数设置了 3 个水平,共获得了 18 个机载激光雷达工作参数组;通过仿真机载激光雷达扫描过程,获得了在 18 组参数设置值下扫描激光脚点的三维坐标误差。通过正交实验误差分析,获得了各工作参数的最优设置值,并探讨了各工作参数的取值特点和规律,为提高机载激光雷达的实际测量精度提供了理论指导。

关键词 遥感;机载激光雷达;三维成像;误差分析;参数最优化设计;正交实验;激光脚点

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0214003

Optimized Design of Parameters Affecting the Accuracy of Airborne LIDAR by Using Orthogonalization-Based Experiments

Wang Jianjun

(¹ School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China)
(² School of Instrument Science & Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract It is very important to select reasonable values of various operating parameters of airborne laser imaging radar (LIDAR), which are closely related to the measurement accuracy of airborne LIDAR. In order to obtain reasonable configuration values of various operating parameters, the three-dimensional (3D) coordinate errors of laser footprints from airborne LIDAR are deduced, and error factors and operating parameters affecting the positioning accuracy of the laser footprints are determined. Then, based on orthogonal experimental design, three levels of configuration values of various operating parameters are selected, respectively, and by cross combination, eighteen orthogonal experiments are designed. For each of the eighteen orthogonal experiments with different levels of configuration values of the operating parameters, the airborne laser scanning procedure are simulated, respectively, and the corresponding 3D coordinate errors of the laser footprints are calculated. By orthogonal experimental error analysis, the optimal configuration values of the operating parameters are obtained. Furthermore, the configuration characteristics and laws of various operating parameters are analyzed, which provide a theoretical guidance for improving the measurement accuracy of airborne LIDAR.

Key words remote sensing; airborne LIDAR; 3D imaging; error analysis; optimal parameter design; orthogonal experimental design; laser footprint

OCIS codes 280.3640; 110.3000; 100.6880; 110.3010

1 引 言

机载激光雷达(LIDAR)技术是近年来发展起

来的新型遥感技术,能够快速获取高精度、高空间分辨率的数字表面模型(DSM)和数字地面模型

收稿日期: 2012-08-15; 收到修改稿日期: 2012-10-25

作者简介: 王建军(1973—),男,博士,讲师,主要从事机载激光雷达三维成像、误差分析与补偿等方面的研究。

E-mail: wangjianjun@aspe.buaa.edu.cn

(DEM)等,在大地测量、城市建模、灾害评估、虚拟现实等许多方面得到日益广泛的应用^[1]。

影响机载激光雷达激光脚点定位精度的测量误差主要来自以下 3 个方面:1) 机载激光雷达系统中各种传感器的测量误差^[2~7];2) 系统集成误差,如计时系统的计时误差^[8]、由于各传感器的采样率不同引入的插值误差^[5,9],以及各传感器的空间相对位置参数的校准误差^[4];3) 计算误差,如数值计算时的截断误差和计算机的工具误差(即舍入误差)等。

当机载激光雷达系统硬件确定后,这 3 种测量误差也基本确定了。但是,在计算机载激光雷达扫描的激光脚点三维坐标时,还有许多的工作参数,如飞机的飞行高度、飞行速度,飞机所处的经纬度、航向,激光雷达的扫描频率、视场角,以及被测地形波动情况,这些工作参数的取值大小,会通过上述 3 种测量误差,间接对机载激光雷达的测量精度造成影响。因此,合理设计各种工作参数的设置值,使机载激光雷达的扫描激光脚点定位精度达到最佳,具有至关重要的现实意义。

目前有不少文献主要集中在各种测量误差对机载激光雷达测量精度的影响分析上,如激光测距误差影响^[6,7],机载平台姿态角测量误差影响等^[9~16]。另外,一些文献研究了机载激光雷达系统的工作参数对机载激光雷达测量精度的影响,如 Næsset^[17]分析了地形因素和飞行及传感器设置参数对机载激光雷达测量树木高度的精度影响;Goodwin 等^[18]分析了扫描角和飞行高度等设置值对机载激光雷达测量森林高度的精度影响;王建军等^[19]研究了机载平台的姿态角变化对机载激光雷达三维成像精度的影响。但采用设计正交实验分析机载激光雷达系统的工作参数对机载激光雷达测量精度的影响,并对工作参数的取值进行最优化设计,国内外尚没有这方面的详细报导,值得进一步深入研究。因此,本文通过对影响机载激光雷达测量精度的误差因素进行综合分析,采用正交实验设计方法,对各工作参数的设置值进行最优化设计,从而为机载激光雷达系统的工作参数设置提供理论依据。

2 理论分析

2.1 机载激光雷达测量原理

激光雷达和惯性测量装置(IMU)、全球定位系统(GPS)等测量装置均固定安装在飞机的安装平台上。图 1 为采用摆镜线扫描方式机载激光雷达工作原理示意图。其中坐标系 $O-x_{LIDAR} y_{LIDAR} z_{LIDAR}$ 为激

光雷达仪器参考坐标系。

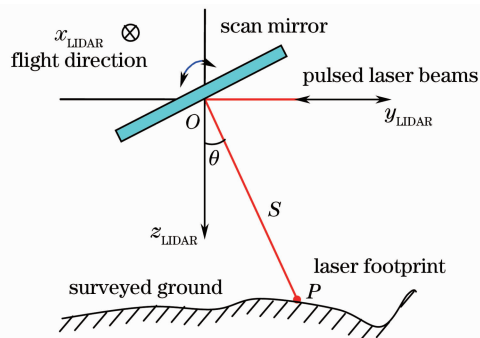


图 1 机载激光雷达工作原理示意图

Fig. 1 Schematic of principle of airborne LIDAR

由图 1 可知,LIDAR 中的扫描摆镜对激光脉冲束进行反射并射向地面,在被测地形表面上产生激光脚点 P ,通过 LIDAR 中的计时功能^[20],测得激光脉冲束从出射点经地面激光脚点返回到接收器的飞行时间,通过计算可获得扫描镜光学中心点 O 到地面激光脚点的距离 S ,同时,由与扫描镜同轴固联的光电角编码器测得扫描摆镜发射激光脉冲束时的瞬时旋转角度 θ ^[21]。根据测距 S 和扫描角 θ ,可计算出以扫描镜光学中心 O 为原点的 $O-x_{LIDAR} y_{LIDAR} z_{LIDAR}$ 坐标系下的激光脚点 P 三维坐标。另外,由 GPS/惯性导航系统(INS)装置测得飞机平台的瞬时空间位置和姿态角,通过坐标转换,可获得激光脚点在以地心为原点的宽带全球卫星通信(WGS)-84 坐标系下的三维坐标^[10,11]为^[6,13]

$$\begin{bmatrix} x_{84} \\ y_{84} \\ z_{84} \end{bmatrix} = R_M \left\{ R_N \left[R_A \left[R_\delta R_\theta \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ S \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x_L^G \\ \Delta y_L^G \\ \Delta z_L^G \end{bmatrix} \right] \right] \right\} + \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 S 为激光测距, (x_G, y_G, z_G) 为 GPS 接收天线相位中心在 WGS-84 坐标系中的三维坐标, $(\Delta x_L^G, \Delta y_L^G, \Delta z_L^G)$ 为激光雷达扫描镜光学中心 O 与 GPS 接收天线相位中心之间的偏心矢量。 R_θ 是与扫描角 θ 有关的旋转矩阵。 R_δ 是将在激光扫描仪参考坐标系(LR)中的激光脚点坐标转换到 IMU 惯性平台参考坐标系(IR)中的旋转矩阵,其旋转角为 LR 坐标系和 IR 坐标系之间的未对准误差角 $(\delta_x, \delta_y, \delta_z)$ 。 R_A 是将在 IR 坐标系中的激光脚点转换到当地水平参考坐标系(LH)中的旋转矩阵,其旋转角为机载平台的滚转角 ω 、俯仰角 φ 和偏航角 κ 。 R_N 是将在 LH 坐标系中的激光脚点坐标转换到当地垂直参考

坐标系(LV)中的转换矩阵,其与测量点处的垂线偏差有关^[22],即 $\mathbf{R}_N = \mathbf{R}_y(-\xi)\mathbf{R}_x(-\eta)$,其中 ξ 为垂线偏差的子午分量(南北方向), η 为卯酉分量(东西方向)。 \mathbf{R}_M 是将在 LV 坐标系中的激光脚点坐标转换到 WGS-84 坐标系中的转换矩阵,旋转角为机载平台所处测量点处的经度 l 和纬度 b ,可由 GPS 的测量值(x_G, y_G, z_G)通过计算获得^[23]。

对于每一个激光发射脉冲,根据各传感器采集的各参数的瞬时数据,如 $S, x_G, y_G, z_G, \theta, \delta_x, \delta_y, \delta_z, \omega, \varphi, \kappa, \Delta x_L^G, \Delta y_L^G, \Delta z_L^G, \xi$ 和 η ,则可通过(1)式,计算得到每个地面激光脚点的三维坐标。

2.2 激光脚点定位误差

实际飞行中,飞机的飞行轨迹变化(x_G, y_G, z_G)是通过控制飞行速度和姿态角来实现的。设初始测量点处经纬度及地心高度坐标为(b_s, l_s, h_s),经过时间 t 后的坐标设为(b, l, h),则在 WGS-84 坐标系中飞机的真实飞行轨迹(b, l, h)与飞行速度 v 及航向角 ω, φ, κ 的关系为

$$\begin{cases} h = h_s + v(-\sin \varphi \cos \kappa + \cos \varphi \sin \omega \sin \kappa)t \\ \int_{b_s}^b \left(\frac{n^2}{\sqrt{m^2 \cos^2 b + n^2 \sin^2 b}} + h \right) db = \\ v(\cos \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa)t \\ \int_{l_s}^l (N+h) \cos b dl = \int_0^t v \cos \omega \sin \kappa dt \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $N = \frac{m}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 b}}$, m, n 是地球椭球的长半轴

和短半轴, e 是椭球扁率。设激光雷达的脉冲重复频率为 f ,则每隔时间 $\Delta t = 1/f$ 发射一个激光脉冲,则 t 时刻发射的激光脉冲产生的激光脚点空间位置(b, l, h)可通过(2)式计算获得。

又根据在 WGS-84 坐标系中的笛卡尔坐标(x_G, y_G, z_G)与纬度、经度及地心高度(b, l, h)的转换关系^[23],则可获得采用笛卡尔坐标的实际飞行轨迹(x_G, y_G, z_G)的表达式为

$$\begin{cases} x_G = (N+h) \cos b \cos l \\ y_G = (N+h) \cos b \sin l \\ z_G = \left(\frac{n^2}{m^2} N + h \right) \sin b \end{cases}. \quad (3)$$

由(1)式,根据机载平台的飞行速度、3个姿态角以及各种被测参数的真实值,可求得真实激光脚点的三维坐标,记为 $[x_{84(r)}, y_{84(r)}, z_{84(r)}]$,其中,下标(r)表示真实值。

实际中各被测量的真实值要通过传感器测量获得,由于各传感器均有测量误差(测量误差=测量值-真实值,各传感器的测量误差值的大小符合各传感器的测量精度指标所描述的误差分布),则将各传感器的测量值代入(1)式中,可计算得到由机载激光雷达获得的测量激光脚点三维坐标,记为 $[x_{84(c)}, y_{84(c)}, z_{84(c)}]$,其中,下标(c)表示测量值。

则由机载激光雷达测量获得的激光脚点的定位误差可表达为

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{84(c)} \\ y_{84(c)} \\ z_{84(c)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{84(r)} \\ y_{84(r)} \\ z_{84(r)} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

2.3 影响机载激光雷达激光脚点定位精度的误差因素和工作参数

由(1)式激光脚点的三维坐标计算式和(4)式激光脚点的定位误差计算式可知,影响机载激光雷达激光脚点的定位精度的因素主要有以下3方面:

1) 各种被测量如测距 S 、飞行轨迹(x_G, y_G, z_G)和姿态角 ω, φ, κ 、扫描角 θ 、未对准误差角($\delta_x, \delta_y, \delta_z$)、偏心矢量($\Delta x_L^G, \Delta y_L^G, \Delta z_L^G$)、垂线偏差角 ξ 和 η 等的测量误差。这些被测量的测量误差会直接造成由机载激光雷达测量的激光脚点偏离真实的地面激光脚点,产生定位误差。

2) 机载激光雷达系统中各种工作参数的初始设置值。在机载激光雷达系统工作时主要有以下7个工作参数:机载激光雷达测量起始点的经纬度坐标(b_s, l_s),飞行速度 v ,飞机相对于地面的飞行高度 H ,设计的飞机飞行航线航向角 κ_d ,扫描视场角($\theta_{FOV} = -\theta_c \sim +\theta_c$),激光雷达脉冲重复频率(PRF, v_{PRF})以及扫描镜扫描频率 f_s 。

3) 被测地形的特点。测量的激光点云的采样密度与被测地形的 DSM 的重建精度密切相关,其一方面与机载激光雷达各种工作参数的初始设置值有关,另一方面也与被测地形的复杂程度有关。所以,除了考虑机载激光雷达系统本身的工作参数取值,还要考虑被测地形特点。

3 正交化实验设计

对于机载激光雷达系统来说,当设备交付使用后,各种传感器的测量误差就基本确定了,则对机载激光雷达测量精度起主要作用的只有机载激光雷达的工作参数的设置值和被测地形的特点两个因素。针对不同的被测地形特点和测绘精度要求,选择最佳的工作参数设置方案,以获得最优的机载激光雷

达测量精度,具有现实的指导意义。因此,本文采用正交实验设计方法,从各个工作参数的取值范围中分别设定3个水平(3个水平要有合适的间隔和分布,同时尽量覆盖取值范围),通过数值仿真,分析工作参数的不同设置值组合下机载激光雷达的测量误差大小。基于仿真实验误差数据,进一步通过正交实验的误差综合分析,确定最佳的工作参数设置值,并分析各工作参数的取值特点和规律,从而使机载激光雷达的测量精度达到最优。

3.1 各传感器测量值的测量误差分布

根据现有的机载激光雷达系统中各传感器的实际测量精度,各被测量的测量误差设置如下^[13,14]: GPS对飞机飞行轨迹(x_G, y_G, z_G)的三坐标测量误

差为均值为0、标准差为0.1 m的高斯随机分布;垂线偏差角 ξ 和 η 为均值为3 ms、标准差为10 ms的高斯随机分布;由IMU测量的机载平台姿态角 ω, φ, κ 的测量误差为均值为0、标准差为 0.05° 的高斯随机分布;扫描角 θ 的测量误差为均值为0、标准差为 0.0005° 的高斯随机分布;激光测距 S 的测量误差为均值为0、标准差为0.1 m的高斯随机分布。

3.2 各工作参数的水平设置

正交实验设计中影响机载激光雷达测量精度的影响因素共有8个,包括7个工作参数和被测地形特点。取正交表为 $L_{18}(2 \times 3^7)$,其中有1个影响因素只设1个水平,其他7个影响因素有3个水平,共组合成18组实验参数值方案,如表1所示。

表1 正交实验设计表 $L_{18}(2 \times 3^7)$

Table 1 Orthogonal experimental table $L_{18}(2 \times 3^7)$

$L_{18}(2 \times 3^7)$ experimental schemes	Eight factors and their three levels								3D coordinate errors of laser points /m		
	PRF	v	(b_s, l_s)	κ_d	H	θ_c	f_s	Ground feature	Δx	Δy	Δz
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.0111	0.1236	0.1243
2	1	1	2	2	2	2	2	2	0.1489	0.1504	0.1033
3	1	1	3	3	3	3	3	3	0.2706	0.2373	0.0859
4	1	2	1	1	2	2	3	3	0.0143	0.1929	0.1961
5	1	2	2	2	3	3	1	1	0.2231	0.2179	0.1534
6	1	2	3	3	1	1	2	2	0.1160	0.1041	0.0386
7	1	3	1	2	1	3	2	3	0.0162	0.1265	0.1262
8	1	3	2	3	2	1	3	1	0.1470	0.1506	0.1010
9	1	3	3	1	3	2	1	2	0.2596	0.2345	0.0823
10	1	1	1	3	3	2	2	1	0.0161	0.2827	0.2762
11	1	1	2	1	1	3	3	2	0.0971	0.1001	0.0725
12	1	1	3	2	2	1	1	3	0.1813	0.1609	0.0565
13	1	2	1	2	3	1	3	2	0.0127	0.2788	0.2773
14	1	2	2	3	1	2	1	3	0.0964	0.0987	0.0673
15	1	2	3	1	2	3	2	1	0.1814	0.1682	0.0651
16	1	3	1	3	2	3	1	2	0.0197	0.2035	0.1924
17	1	3	2	1	3	1	2	3	0.2087	0.2148	0.1450
18	1	3	3	2	1	2	3	1	0.1179	0.1044	0.0401

8个影响因素的水平设置如下。在7个工作参数中,脉冲重复频率基本不变,在本实验中取为固定值10 kHz,即只有1个水平。其他6个工作参数分别取3个水平,即:飞行速度 v 取40、60、80 m/s;测量起始点 (b_s, l_s) 取 $(0^\circ, 0^\circ)$ 、 $(45^\circ, 45^\circ)$ 、 $(60^\circ, 60^\circ)$;航向角 κ_d 取 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$;飞行高度 H 取400、500、600 m;扫描角临界值 θ_c 取 $10^\circ, 15^\circ, 22.5^\circ$;扫描频率取50、80、100 Hz。另外,“被测地形特点”分别取为周期为20 m、幅值为5 m的一维正弦曲面,周期为50 m、幅值为5 m的一维正弦曲面,以及平面(周期无穷大)共3个水平。对于每个影响因素,3个水

平分别标记为1、2、3(其中PRF只有水平1)。

3.3 正交实验方法和结果

在表1的18组正交实验中,针对每一组实验,首先根据8个影响因素的设置值,模拟真实的机载激光雷达扫描过程,对设置的被测地形进行扫描,获得测距值等被测量的真实值(见3.1节),在不考虑被测量的测量误差情况下,代入(1)式可获得真实的地面激光脚点三维坐标。其次,通过数值仿真,模拟各被测量的随机测量误差分布,对上述获得的测距值等被测量的真实值,分别叠加上模拟的随机测量误差分布值(见3.1节),即看做各被测量的测量值,

代入(1)式可获得由机载激光雷达测量的激光脚点三维坐标。最后,根据(4)式,获得机载激光雷达测量的激光脚点定位误差,实验中全部扫描激光脚点的三维坐标误差的均方根误差(RMSE)统计值表示为激光脚点的定位精度。

以第1组实验方案为例进行说明。在WGS-84坐标系下,在地球椭球表面经纬度为(0°,0°)处建立了周期为20 m、幅度为5 m的一维正弦波动地形数

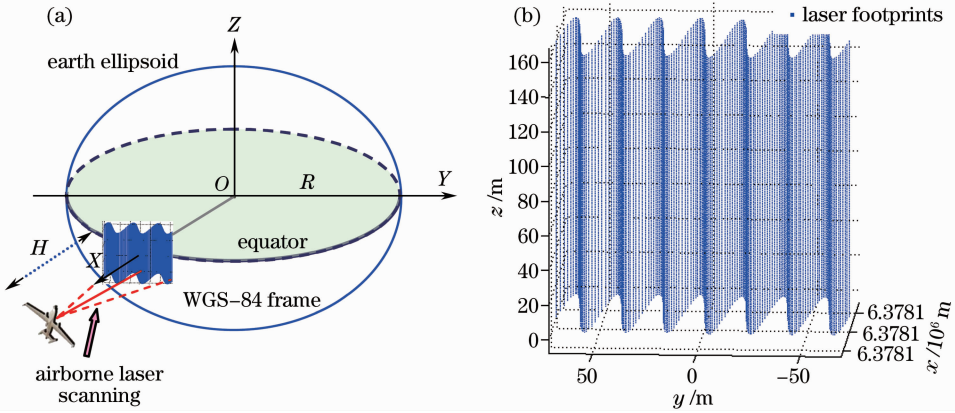


图2 机载激光雷达对地(a)扫描示意图及(b)扫描激光点云(第1组实验方案)

Fig. 2 (a) Schematic of airborne LIDAR scanning experiments and (b) scanned laser point cloud (for the first experimental scheme)

对扫描实验中获得的各被测量的真实值,分别叠加3.1节描述的各被测量的随机测量误差分布值,获得由机载激光雷达测量的激光脚点三维坐标,与真实激光脚点相比较,可获得40,000个激光脚点的三维坐标误差,其RMSE统计值作为激光脚点的定位精度,即如表1所示的第1组实验的结果: $\Delta x=0.0111\text{ m}$, $\Delta y=0.1236\text{ m}$, $\Delta z=0.1243\text{ m}$ 。其他各组的实验方法与此相似,实验结果如表1所示。

3.4 正交实验误差综合分析

针对正交化表设计的18组实验的参数设置值,

表2 机载激光雷达测量误差分析(单位:m)

Table 2 Error analysis for measurement errors of airborne LIDAR (unit: m)

	$\Delta x / \text{m}$				$\Delta y / \text{m}$				$\Delta z / \text{m}$			
	K_{1j}	K_{2j}	K_{3j}	R_j	K_{1j}	K_{2j}	K_{3j}	R_j	K_{1j}	K_{2j}	K_{3j}	R_j
v	0.7251	0.6439	0.7691	0.1252	1.055	1.0606	1.0343	0.0263	0.7187	0.7978	0.687	0.1108
(b_s, l_s)	0.0901	0.9212	1.1268	1.0367	1.208	0.9325	1.0094	0.2755	1.1925	0.6425	0.3685	0.824
k_d	0.7722	0.7001	0.6658	0.1064	1.0341	1.0389	1.0769	0.0428	0.6853	0.7568	0.7614	0.0761
H	0.4547	0.6926	0.9908	0.5361	0.6574	1.0265	1.466	0.8086	0.469	0.7144	1.0201	0.5511
θ_c	0.6768	0.6532	0.8081	0.1549	1.0328	1.0636	1.0535	0.0308	0.7427	0.7653	0.6955	0.0698
f_s	0.7912	0.6873	0.6596	0.1316	1.0391	1.0467	1.0641	0.025	0.6762	0.7544	0.7729	0.0967
Ground feature	0.6966	0.654	0.7875	0.1335	1.0474	1.0714	1.0311	0.0403	0.7601	0.7664	0.677	0.0894

另外,根据误差分析的实验结果,可选择出最佳的工作参数设置值组,使机载激光雷达扫描激光脚点的定位误差达到最小,从而测量精度最优。

值仿真模型。根据第1组实验的影响因素水平值,机载激光雷达的7个工作参数设置值为:设计航向角为0°,飞行速度为40 m/s,测量起始经纬度位置为(0°,0°),飞机在地面上的飞行高度为400 m,扫描角临界值为 $\theta_c=10^\circ$,扫描频率为50 Hz。模拟机载激光雷达对该被测地形的扫描过程,扫描时间为4 s,获得的扫描点云(含40,000个模拟的真实激光脚点),如图2所示。

分别获得了机载激光雷达扫描激光脚点的三维坐标定位误差,并对此18组误差进行了正交实验误差综合分析,如表2所示。其中, K_{1j} 、 K_{2j} 和 K_{3j} 分别是在各影响因素的每个水平下激光脚点三维坐标定位误差的算术累加和,其中1,2,3代表3个水平, j 代表8个影响因素中的某一个。 R_j 是极差(即 K_{1j} 、 K_{2j} 和 K_{3j} 3个值中的最大值减去最小值)。极差反映了该影响因素的取值变化对激光脚点三维坐标测量误差的影响程度,极差越大,说明该影响因素的作用越强。

4 实验结果分析

4.1 使机载激光雷达测量精度最高的最佳工作参数设置方案

根据表 2 的极差统计值 (R_j) 可知,各工作参数对激光脚点 Δx 坐标误差的影响由大到小排序为: $(b_s, l_s) > H > \theta_c > \text{地形特点} > f_s > v > \kappa_d$; 对激光脚点 Δy 坐标误差的影响由大到小排序为: $H > (b_s, l_s) > \kappa_d > \text{地形特点} > \theta_c > v > f_s$; 对激光脚点 Δz 坐标误差的影响由大到小排序为: $(b_s, l_s) > H > v > f_s > \text{地形特点} > \kappa_d > \theta_c$ 。可见,测量地点和飞行高度对测量精度的影响最大。

该正交实验的分析对象是机载激光雷达扫描激光脚点的三维坐标误差,由于误差值越小越好(反映

了机载激光雷达测量精度越高),则根据 K_{1j} 、 K_{2j} 和 K_{3j} 3 个统计值,统计值越小,则该工作参数的取值方案越好。故由表 1 和表 2 数据,可获得如下的最佳参数设计方案。1) 要使 Δx 最小,则各工作参数的水平应取为: $(b_s, l_s)_1 - H_1 - \theta_{c2} - \text{地形特点} 2 - f_{s3} - v_2 - \kappa_d$; 2) 要使 Δy 最小,则各工作参数的水平应取为: $H_1 - (b_s, l_s)_3 - \kappa_{d1} - \text{地形特点} 3 - \theta_{c1} - v_3 - f_{s1}$; 3) 要使 Δz 最小,则各工作参数的水平应取为: $(b_s, l_s)_3 - H_1 - v_3 - f_{s1} - \text{地形特点} 3 - \kappa_{d1} - \theta_{c3}$ 。其中的下标 1,2,3 即各工作参数的最佳水平值。

4.2 各工作参数取值对机载激光雷达测量精度的影响规律分析

根据表 2 中各个工作参数的 K_{1j} 、 K_{2j} 和 K_{3j}

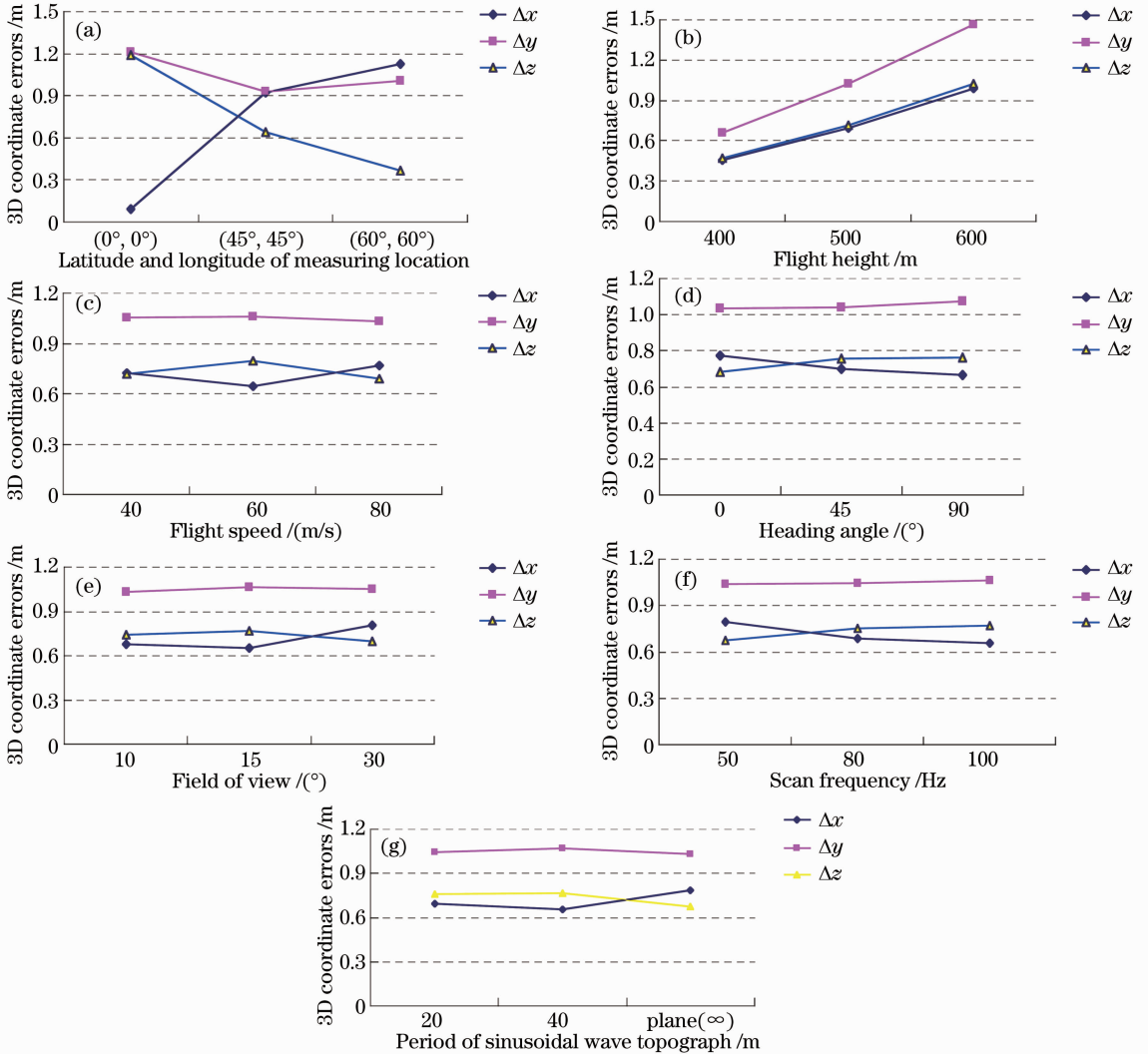


图 3 各工作参数的设置值变化对机载激光雷达测量精度的影响。(a)测量点经纬度; (b)飞行高度; (c)飞行速度; (d)设计航向角; (e)扫描视场角; (f)扫描频率; (g)被测地形特点

Fig. 3 Impacts of configuration values of operating parameters on measurement accuracy of airborne LIDAR. (a) Latitude and longitude of the measuring location; (b) flight height; (c) flight speed; (d) heading angle; (e) field of view; (f) scan frequency; (g) period of sinusoidal wave topograph

统计值,各工作参数的不同设置值对机载激光雷达测量精度的影响如图 3 所示。

根据图 3,可以得出各工作参数取值对机载激光雷达测量精度的影响规律。

1) 在地球上不同测量起始点的影响规律。如图 3(a)所示,在地球上不同经纬度的测量起始点进行激光扫描测量时,激光脚点 3 个坐标的测量精度

有所不同。

当测量起始点确定时,分析在各测量起始点下的工作参数设置值的选择,使激光脚点测量误差达到最小,这里不考虑地形因素和 LIDAR 中的工作参数(如 f_s 和 θ_c 等),只考虑机载平台的飞行状态参数 v, κ_d 和 H 的影响特点,如表 3 所示。

表 3 在不同测量起始点处飞行状态参数的设置值影响规律(单位:m)

Table 3 Impacts of different values of flight parameters at different measuring locations (unit: m)

(b_s, l_s)	Accumulated errors for three levels	v			κ_d			H		
		Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz
$(0^\circ, 0^\circ)$	K_{1j}	0.0272	0.4063	0.4005	0.0254	0.3165	0.3204	0.0273	0.2501	0.2505
	K_{2j}	0.027	0.4717	0.4734	0.0289	0.4053	0.4035	0.034	0.3964	0.3885
	K_{3j}	0.0359	0.33	0.3186	0.0358	0.4862	0.4686	0.0288	0.5615	0.5535
$(45^\circ, 45^\circ)$	K_{1j}	0.246	0.2505	0.1758	0.3058	0.3149	0.2175	0.1935	0.1988	0.1398
	K_{2j}	0.3195	0.3166	0.2207	0.372	0.3683	0.2567	0.2959	0.301	0.2043
	K_{3j}	0.3557	0.3654	0.246	0.2434	0.2493	0.1683	0.4318	0.4327	0.2984
$(60^\circ, 60^\circ)$	K_{1j}	0.4519	0.3982	0.1424	0.441	0.4027	0.1474	0.2339	0.2085	0.0787
	K_{2j}	0.2974	0.2723	0.1037	0.2992	0.2653	0.0966	0.3627	0.3291	0.1216
	K_{3j}	0.3775	0.3389	0.1224	0.3866	0.3414	0.1245	0.5302	0.4718	0.1682

在地点 $(b_s, l_s)_1$,即在地球赤道 $(0^\circ, 0^\circ)$ 处,采用 $v_3 - \kappa_{d1} - H_1$ 参数设计方案时机载激光雷达测量误差最小。随飞行速度 v 的增大,激光脚点的 x 方向误差 Δx 稍微有所增大,而 $\Delta y, \Delta z$ 明显减小。故在满足采样点密度的前提下,应尽量采用较大的飞行速度,可使测量误差最小。设计航向角 κ_d 尽量为 0 方向(即正北)时,测量误差最小。在地点 $(b_s, l_s)_2$,即 $(45^\circ, 45^\circ)$ 处,采用 $v_1 - \kappa_{d3} - H_1$ 参数取值方案时机载激光雷达测量误差最小;此时的飞行速度应尽量小,且航向角 κ_d 取 90° 时测量误差最小。在地点 $(b_s, l_s)_3$,即 $(60^\circ, 60^\circ)$ 处,采用 $v_2 - \kappa_{d2} - H_1$ 参数取值方案时机载激光雷达测量误差最小;此时飞行速度应取 60 m/s 左右,不能太大或太小,且航向角 κ_d 取 45° 时误差最小。因此当机载激光雷达在不同的地球测量点扫描时,应采用合适的参数取值,以获得最佳测量精度。

2) 飞行高度的影响规律。如图 3(b)所示,飞行高度 H 对机载激光雷达扫描激光脚点三维坐标精度的影响是最显著的。随着飞行高度的增加,测量误差亦随之增大,所以实际飞行时应尽量采用较低的飞行高度,尽量避免机载激光雷达测量精度的降低。

3) 飞行速度的影响规律。如图 3(c)所示,飞行速度中等时, x 坐标的误差较小,而 y, z 坐标的误差较大;当飞行速度增加或减小,都会使 x 坐标误差稍有增加,而 y, z 坐标误差稍有减小。

4) 航向角 κ_d 的影响规律。如图 3(d)所示,随着设计航向角 κ_d 的增大, x 坐标的误差稍减,而 y, z 坐标的误差稍微增加。不管 κ_d 取何值, y 坐标误差都较大,而 x, z 坐标误差相对较小。

5) 扫描视场角的影响规律。如图 3(e)所示,随着扫描视场角的增大, x 坐标的误差增大,而 y 坐标的误差稍微增加, z 坐标的误差稍微减小。不管 θ_c 取何值, y 坐标的误差都较大,而 x, z 坐标的误差相对较小。

6) 扫描频率的影响规律。如图 3(f)所示,随着扫描频率的增大, x 坐标的误差稍微减小,而 y, z 坐标的误差稍微增加,但影响不太显著。不管 f_{sc} 取何值, y 坐标的误差都较大,而 x, z 坐标的误差相对较小。

7) 被测地形特点的影响规律。如图 3(g)所示,地形频率的变化会使 3 个坐标误差有所改变,但由机载激光雷达获得的激光脚点三维坐标误差总算术累加和基本不变。地形越平坦(频率越小), x 坐标误差先减小后增大,而 y, z 坐标误差是先稍增大,后有所减小。

5 结 论

机载激光雷达扫描被测地形表面,获得地面激光脚点,形成激光点云,进而可用于曲面拟合,重建被测地形。由于 3 个方面的因素影响,即机载激光

雷达测量系统中各种传感器的测量误差、各工作参数取值以及被测地形特点,通过机载激光雷达测量获得的激光脚点会偏离真实的地面激光脚点,造成激光脚点定位误差,使重建的地形数字表面模型产生失真。而当机载激光雷达的硬件设备确定以后,各种传感器的测量误差就确定了,则对机载激光雷达测量精度起主要作用的是各种工作参数的设置值和被测地形特点。

采用正交实验设计方法,对 18 个各工作参数设置值组合后进行正交实验,分析了在各组参数设置值下,机载激光雷达扫描激光脚点的三维坐标误差。通过正交实验的综合误差分析,确定了各工作参数设置值对机载激光雷达测量精度的影响规律和特点,并获得了各工作参数的最佳设置值。

参 考 文 献

- 1 E. P. Baltsavias. A comparison between photogrammetry and laser scanning[J]. *J. Photogrammetry & Remote Sensing*, 1999, **54**(2-3): 83~94
- 2 M. Mostafa, J. Hutton, B. Reid. GPS/IMU products-the applanix approach[C]. Photogrammetric Week, 2001, **1**: 63~82
- 3 Jianwei Wu, Hongchao Ma, Qi Li *et al.*. Error analysis on laser measurement device of airborne LIDAR [C]. *SPIE*, 2007, **6786**: 678653
- 4 T. Schenk. Modeling and analyzing systematic errors in airborne laser scanners[C]. Technical Notes in Photogrammetry No 19, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, the Ohio State University, 2001
- 5 M. R. Mostafa. Precise airborne GPS positioning alternatives for the aerial mapping practice[C]. From Pharaohs to Geoinformatics FIG Working Week 2005 and GSDI-8, 2005. 1~9
- 6 Zhang Xiaohong. Airborne Laser Radar Theory and Methods of Measurement Technology [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007. 57~62, 65, 72~75
张小红. 机载激光雷达测量技术理论和方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007. 57~62, 65, 72~75
- 7 You Hongjian, Jiang Yuesong, Li Shukai. Error analysis and accuracy estimation of airborne remote sensing with air-to-ground positioning system[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1998, **27**(1): 86~91
尤红建, 江月松, 李树楷. 机载遥感直接对地定位的误差分析和精度估计[J]. 测绘学报, 1998, **27**(1): 86~91
- 8 Wang Fei, Zhao Yuan, Zhang Yu *et al.*. Theoretical analysis of influence of laser signal strength on range precision in single photon ranging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2771~2775
王飞, 赵远, 张宇等. 激光脉冲强度对于盖革模式单光子探测测距精度影响的理论研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 2771~2775
- 9 RIEGL Laser Measurement Systems: LMS-Q560[EB/OL]. <http://www.riegl.com/products/airborne-scanning/productdetail/product/scanner/6/>. [2012-10-06]
- 10 Wang Jianjun, Xu Lijun, Li Xiaolu. Impacts of random attitude measurement errors on airborne laser scanning image[J]. *Chinese*

- J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0314001
王建军, 徐立军, 李小路. 姿态角随机测量误差对机载激光扫描成像的影响[J]. 中国激光, 2011, **38**(3): 0314001
- 11 Shu Ning. Laser Imaging [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005. 41~48, 93~94
舒宁. 激光成像[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005. 41~48, 93~94
- 12 Li Shukai, Xue Yongqi. The Integrated Technology System of High Efficiency Three-Dimensional Remote Sensing[M]. Beijing: Science Press, 2000. 97
李树楷, 薛永祺. 高效三维遥感集成技术系统[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 97
- 13 Jiang Yuesong. A rigorous positioning equation and it's error analysis and precision evaluation for integrated positioning system of airborne GPS, INS and laser scanning ranging[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2001, **5**(4): 241~271
江月松. 机载 GPS、姿态和激光扫描测距集成定位系统的精确定位方程、误差分析与精度评估[J]. 遥感学报, 2001, **5**(4): 241~271
- 14 G. C. Guenther, A. G. Cunningham, P. E. LaRocque *et al.*. Meeting the accuracy challenge in airborne LIDAR bathymetry [C]. Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR, 2000. 1~27
- 15 S. Filin. Recovery of systematic biases in laser altimeters using natural surfaces[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2003, **69**(11): 1235~1242
- 16 Jianjun Wang, Lijun Xu, Xiaolu Li *et al.*. Quantitative analysis and sort of impacts of random measurement errors on ALS accuracy[J]. *IEEE Trans. Instru. & Meas.*, 2012, **61**(8): 2242~2252
- 17 E. Næsset. Influence of terrain model smoothing and flight and sensor configurations on detection of small pioneer trees in the Boreal-Alpine transition zone utilizing height metrics derived from airborne scanning lasers[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**(10): 2210~2223
- 18 N. R. Goodwin, N. C. Coops, D. S. Culvenor. Assessment of forest structure with airborne LIDAR and the effects of platform altitude[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **103**(2): 140~152
- 19 Wang Jianjun, Xu Lijun, Li Xiaolu *et al.*. Impact of attitude deviations on laser point cloud of airborne LIDAR[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, **32**(8): 1810~1817
王建军, 徐立军, 李小路等. 姿态角扰动对机载激光雷达点云数据的影响[J]. 仪器仪表学报, 2011, **32**(8): 1810~1817
- 20 Jiang Haijiao, Lai Jiancheng, Wang Chunyong *et al.*. Research on ranging property of laser radar and its range accuracy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0514001
姜海娇, 来建成, 王春勇等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0514001
- 21 Zhi Ya'nan, Yan Aimin, Shu Rong *et al.*. High-speed digital beam scanner based on electro-optic crystal switch array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3430~3434
职亚楠, 闫爱民, 舒嵘等. 高速电光晶体开关阵列数字光束扫描器[J]. 光学学报, 2010, **30**(12): 3430~3434
- 22 J. Kudryns. Automatic determination of the deflections of the vertical-first scientific results [J]. *Acta Geodyn. Geomater.*, 2009, **6**(3): 233~238
- 23 Gaomu Ganxiang, Xiatian Yangjiu. Handbook of Image Analysis [M]. Sun Weidong Transl.. Beijing: Science Press, 2007. 124
高木干雄, 下田阳久. 图像处理技术手册[M]. 孙卫东译. 北京: 科学出版社, 2007. 124