

# 高光谱成像激光雷达扫描镜的分析与设计

钱立勇<sup>1,2,3</sup>, 吴德成<sup>1\*</sup>, 刘东<sup>1,2,3</sup>, 周晓军<sup>1</sup>, 魏巍<sup>1</sup>, 钟刘军<sup>1</sup>, 王文举<sup>1</sup>, 王英俭<sup>1,2,3</sup>, 龚威<sup>4</sup>

<sup>1</sup>中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

<sup>3</sup>先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;

<sup>4</sup>武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430072

**摘要** 扫描镜是高光谱成像激光雷达的重要组成部件, 因此, 分析了多面体转镜扫描、振镜扫描、圆锥扫描三种扫描方式, 推导了不同扫描方式的轨迹, 并结合飞机航迹得到发射激光扫描轨迹与扫描方式的关系。在此基础上, 设计了一种用于高光谱成像激光雷达系统的圆锥扫描方式。实验结果表明, 在飞行高度为 500 m、激光脉冲重复频率为 130 kHz、激光发散角为 0.3 mrad 时, 该方式满足视场角等于 30°、两个相邻脉冲夹角小于 1 mrad 的要求。相比其他扫描方式, 圆锥扫描可提高激光雷达光斑脚点的密度, 为数据的有效采集和地物的精准分类提供了帮助。

**关键词** 遥感; 扫描镜; 成像系统; 扫描轨迹; 激光雷达

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0928002

## Analysis and Design of Hyperspectral Imaging LiDAR Scanning Mirror

Qian Liyong<sup>1,2,3</sup>, Wu Decheng<sup>1\*</sup>, Liu Dong<sup>1,2,3</sup>, Zhou Xiaojun<sup>1</sup>, Wei Wei<sup>1</sup>,  
Zhong Liu jun<sup>1</sup>, Wang Wenju<sup>1</sup>, Wang Yingjian<sup>1,2,3</sup>, Gong Wei<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

<sup>3</sup>Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China;

<sup>4</sup>State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,  
Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China

**Abstract** The scanning mirror is an important component of hyperspectral imaging LiDAR. Three scanning modes of polyhedral rotating mirror scanning, vibrator mirror scanning, and conical scanning are analyzed in this paper. Traces of different scanning modes are deduced, and the relationship between laser scanning traces and scanning modes is obtained by combining aircraft tracks. On this basis, a conical scanning mode for hyperspectral imaging LiDAR system is designed. Experimental results show that when the flight altitude is 500 m, the repetition frequency of the laser pulse is 130 kHz and the divergence angle of the laser pulse is 0.3 mrad. The method meets the requirements of the field angle of 30° and the angle between two adjacent pulses is less than 1 mrad. Compared with other scanning methods, conical scanning can improve the density of LiDAR spot footprints, which provides help for effective data collection and accurate classification of ground objects.

**Key words** remote sensing; scanning mirrors; imaging systems; scanning trace; LiDAR

**OCIS codes** 280.3640; 120.5800; 120.4820

收稿日期: 2020-09-03; 修回日期: 2020-09-28; 录用日期: 2020-12-01

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504503)

\* E-mail: dchwu@aiofm.ac.cn

## 1 引言

传统三维成像对地观测采用点面结合的方式,得到的地物影像是一个面,激光测距信息是一个点<sup>[1-3]</sup>。利用激光脚点的反射率可分类地面的地物信息,如道路、草地、农田;依据激光脚点的反射强度信息可探测林区的大型石块和悬崖,从而提高机载 LiDAR 获取山区地形数据的精度,但这些方法不能从根本上改善机载 LiDAR 探测能力不足的问题<sup>[4]</sup>。虽然传统方法在三维空间信息获取方面具有突出优点,但受单一波长探测能力的限制,在地物的物性分类、状态等方面的探测与传统被动遥感探测方法还存在一定距离<sup>[5-6]</sup>。随着 LiDAR 技术的不断发展,成像 LiDAR 由单一波长测量发展为高光谱成像,技术手段也逐渐变为点和点结合的方式,即地物的高光谱信息是一个点,距离信息也是一个点,从而实现对地物信息的精准观测<sup>[7-9]</sup>。

高光谱成像 LiDAR 可以快速获取地物目标信息,广泛应用于森林遥感、城市遥感、精细加工、国防安全等领域<sup>[10]</sup>。对于高光谱成像 LiDAR 扫描系统,不同波长的光经过扫描镜后的折射率不同,光不能会聚到某一点,导致透射式扫描方式无法体现高光谱成像 LiDAR 的优势。因此,高光谱成像 LiDAR 普遍采用反射式扫描系统,如多面体转镜扫描、振镜扫描、圆锥扫描<sup>[11-12]</sup>。

机载高光谱 LiDAR 具有速度快、精度高、价格低等优点,广泛应用于森林调查、农业监测、土地监测、资源勘查等领域。因此,本文分析设计了高光谱成像 LiDAR 扫描系统的扫描单元,分析了三种不同的扫描方式,并设计出飞行高度为 500 m、激光脉冲重复频率为 130 kHz、激光发散角为 0.3 mrad 情况下能实现扫描视场角等于 30°、两个相邻激光脉冲夹角  $\theta \leq 1$  mrad 的扫描单元。实验结果表明,该

扫描单元可精准、高效地获取地物目标的光谱信息和距离信息,提高系统对植被、森林、土壤、岩石等地物的区分精度以及对森林植被生长状态、土壤成分等地物状态的探测能力。

## 2 LiDAR 扫描单元

激光作为主动式高光谱成像 LiDAR 的光源,具有很好的指向性,但单发激光脉冲也只能获取小块地物目标的光谱信息。因此,需要通过扫描系统不断改变激光的空间指向,从而实现对地物目标的区域扫描。由于高光谱成像 LiDAR 系统发射的是宽波段激光脉冲,为了保证不同波长的激光能对同一地物目标进行探测,需使用没有色差的反射光学扫描结构。

图 1 为目前高光谱成像 LiDAR 系统的反射式扫描方式,包括多面体转镜扫描、振镜扫描、圆锥扫描。可以发现,不同扫描系统的结构和控制系统有明显差异,导致高光谱成像 LiDAR 系统在实际工作中的扫描方式也存在明显区别<sup>[13]</sup>。多面体转镜由驱动电机和多面镜(可以是正多面体镜)组成,工作时遵循反射定律,通过控制电机不断改变光轴方向,进一步改变出射光束的偏转角<sup>[14]</sup>,如图 1(a)所示。为了抑制背景光噪声,实际中处理回波信号时需要控制系统的接收视场角,导致多面体转镜在扫描过程中,扫描线之间无法完全连接,存在地物信息缺失的问题。振镜是一种优良的矢量器件,振镜的驱动电机可使镜面沿转动轴进行往返正弦摆动<sup>[15]</sup>,如图 1(b)所示。其中, $\alpha$  为半扫描视场角。振镜扫描过程中,控制电机存在不断加速和减速的过程,导致扫描光斑会出现中间疏、两头密的情况。因此,在实际工程中应用振镜时,需减少电机控制系统中扫描电流的高频成分<sup>[16]</sup>。圆锥扫描的镜面与转轴有一定的偏置角  $\gamma$ ,电机转动速度为  $\omega$ ,如图 1(c)所

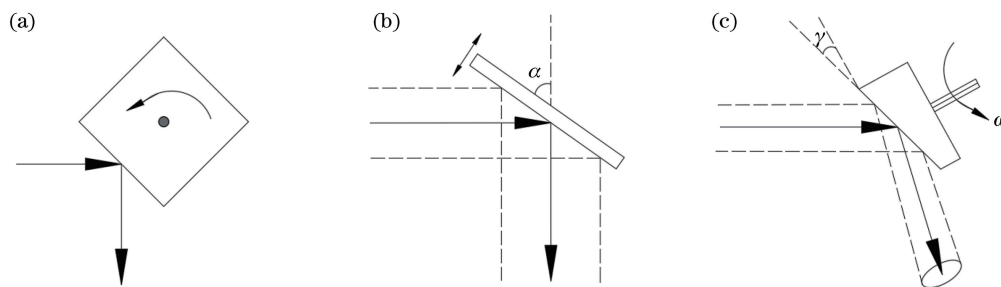


图 1 LiDAR 系统的扫描方式。(a)多面体转镜扫描;(b)振镜扫描;(c)圆锥扫描

Fig. 1 Scanning mode of the LiDAR system. (a) Polyhedral rotating mirror scanning; (b) vibrator mirror scanning; (c) conical scanning

示。当转轴转动时,激光脉冲在地面呈卵形线扫描。相比多面体转镜和振镜扫描,圆锥扫描方式能实现对地物信息的饱和覆盖式扫描,从而提高系统对地物信息的识别精度。但该方式的机械结构比较复杂,需在保证转镜反射面与转轴呈一定夹角的前提下稳定运转扫描单元。

### 3 扫描轨迹的仿真与设计

#### 3.1 多面体转镜扫描

图 2 为四面体扫描转镜,其切面为正方形,外接圆半径为  $R$ ,入射光线为  $FB$ ,入射角为  $\beta$ ,反射光线为  $BF'$ , $CD$  为四面体转镜  $A'B'$  面的法线。四面体转镜绕  $Z$  轴逆时针旋转,反射光线以  $BF'$  方向入射到地物目标表面。

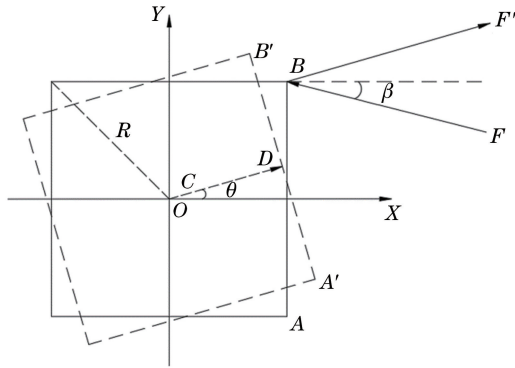


图 2 四面体扫描转镜原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the tetrahedron scanning mirror

入射光线  $FB$  可用单位矢量表示为  $(-\cos \beta, \sin \beta)$ ,四面体转镜围绕  $Z$  轴逆时针旋转,且转镜旋转角为  $\theta$  时,法线  $CD$  的单位矢量为  $(\cos \theta, \sin \theta)$ 。根据反射定律可知

$$\mathbf{L}_{BF'} = \mathbf{L}_{FB} - 2(\mathbf{L}_{FB} \cdot \mathbf{L}_{CD}) \cdot \mathbf{L}_{CD}, \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{L}$  为线段对应的向量。反射光线  $BF'$  的单位矢量可表示为

$$\frac{\mathbf{L}_{BF'}}{|\mathbf{L}_{BF'}|} = \frac{[2\cos(\theta + \beta)\cos \theta - \cos \beta \quad 2\cos(\theta + \beta)\sin \theta + \sin \beta]}{\dots} \quad (2)$$

如图 2 中  $B$  点坐标为  $(R/\sqrt{2}, R/\sqrt{2})$ ,则入射到转镜表面的光线  $FB$  可表示为

$$y - R/\sqrt{2} = -\tan \beta(x - R/\sqrt{2}), \quad (3)$$

四面体转镜  $A'B'$  面可表示为

$$x \cos \theta + y \sin \theta = R/\sqrt{2}. \quad (4)$$

由于入射光线  $FB$  与四面体转镜  $A'B'$  面相交,

联立(3)式和(4)式,得到入射光线  $FB$  在四面体转镜  $A'B'$  面上的反射点坐标  $(x_0, y_0)$  为

$$x_0 = \frac{(R/\sqrt{2})(1 - \sin \theta \tan \beta - \sin \theta)}{\cos \theta - \sin \theta \tan \beta},$$

$$y_0 = \frac{(R/\sqrt{2})\tan \beta(1 - \cos \theta) - R/\sqrt{2}\cos \theta}{\sin \theta \tan \beta - \cos \theta}. \quad (5)$$

联立(2)式和(5)式,得到入射光线  $FB$  在四面体转镜  $A'B'$  面上的反射光线  $B'F'$  为

$$y - y_0 = \frac{2\cos(\theta + \beta)\sin \theta + \sin \beta}{2\cos(\theta + \beta)\cos \theta - \cos \beta}(x - x_0), \quad (6)$$

$$x = \frac{2\cos(\theta + \beta)\cos \theta - \cos \beta}{2\cos(\theta + \beta)\sin \theta + \sin \beta}(y - y_0) + x_0. \quad (7)$$

实际扫描时,若四面体转镜的外接圆半径  $R = 0.2 \text{ m}$ ,入射角  $\beta = 45^\circ$ ,旋转角  $\theta = 15^\circ$ ,得到地物目标表面的光斑分布如图 3 所示。

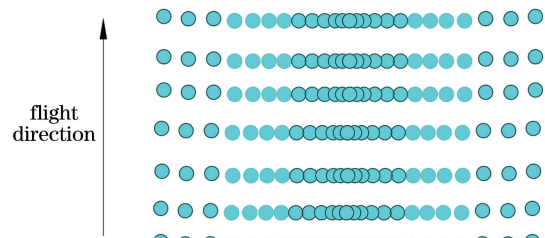


图 3 四面体转镜的扫描轨迹

Fig. 3 Scanning trace of the tetrahedral rotating mirror

假设扫描转镜的转动频率为  $f_1$ ,激光脉冲的重复频率为  $f_2$ ,相邻激光脉冲之间的夹角为  $\theta_1$ ,激光脉冲扫描到地面时地面足印点的间距为  $s$ ,如图 4(a)所示。在 1 s 内,LiDAR 扫描转镜旋转的角度为  $2\pi f_1$ ,相邻两个激光脉冲的时间间隔为  $1/f_2$ ,该间隔内扫描转镜的偏转角  $\varphi = 2\pi f_1/f_2$ 。

图 4(b)中,扫描转镜的偏转角为  $\varphi$  时,脉冲夹角  $\theta_2$  的偏转角为  $2\varphi$ ,依据设计要求,即两个相邻脉冲夹角  $\theta_1 \leq 1 \text{ mrad}$ ,得到

$$\theta_2 = 2\varphi = 4\pi f_1/f_2 \leq 1 \text{ mrad}. \quad (8)$$

可以发现,当激光脉冲的重复频率为 130 kHz 时,转镜的扫描频率  $f_1 \leq 10.35 \text{ Hz}$ 。图 4(c)中的 FOV 为 LiDAR 系统的视场角,指激光束通过扫描装置能达到的最大角度范围,对应地面上的扫描幅宽  $W$ 。当飞行高度一定时,扫描角度越大,扫描幅宽越宽。当飞行高度为  $H$ ,  $W = 2H \tan \frac{X_{\text{FOV}}}{2}$ ,飞行

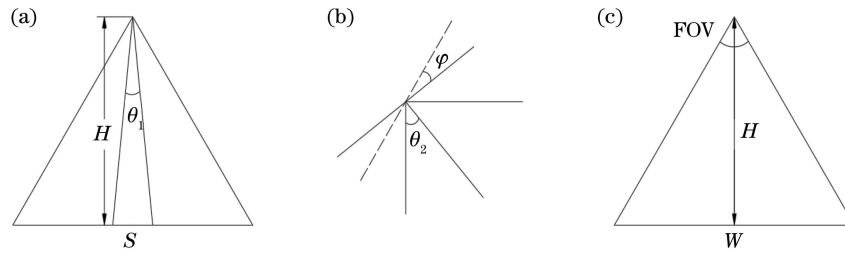


图 4 扫描轨迹的原理。(a)激光脉冲夹角示意图;(b)转镜偏转角与激光脉冲夹角;(c)视场角与扫描带宽

Fig. 4 Schematic diagram of the scanning trace. (a) Schematic diagram of the laser pulse included angle; (b) rotating mirror deflection angle and laser pulse included angle; (c) field of view angle and scanning bandwidth

高度为 500 m,扫描视场角为 30°时,扫描幅宽可表示为

$$W = 2H \tan \frac{\alpha_{FOV}}{2} = 268 \text{ m}, \quad (9)$$

两个相邻脉冲的夹角  $\theta$  为 1 mrad 时,激光脉冲的脚点间距

$$s = 2H \cdot \tan \frac{\theta}{2} = 0.5 \text{ m}, \quad (10)$$

激光脉冲的发散角为 0.3 mrad 且激光脉冲垂直于地面时,光斑直径

$$s_{\text{spot}} = 2 \times 500 \text{ m} \cdot \left( \tan \frac{0.3 \text{ mrad}}{2} \right) = 0.15 \text{ m}. \quad (11)$$

扫描转镜的旋转频率为 10 Hz,飞机的飞行速度为 90 m/s 时,四面体扫描转镜在地面相邻两条扫描线之间的垂直距离  $L$  可表示为

$$L = \frac{90 \text{ m/s} \times 0.1 \text{ s}}{4} = 2.25 \text{ m}. \quad (12)$$

为了减小两条扫描线之间的垂直距离,必须提高转镜的转动频率。以四面体转镜为例,当转动频率达到 2400 r/min 时,两条扫描线之间的垂直距离为 0.5625 m。从(12)式可以发现,为了减小线与线之间的扫描间隔,需要加快转镜的转动频率,但过高的转动频率又会导致数据处理时出现过采样现象。实际采样时,考虑到高光谱成像 LiDAR 回波信号点云的数据处理,理想情况下,激光脉冲入射到地面时,相邻两个扫描光斑依次有序相连,即激光脉冲脚点的间距为 0.3 m,此时两个脉冲之间的夹角  $\theta = 0.6 \text{ mrad}$ ,转镜的转动频率  $f_1 \leq 6.21 \text{ Hz}$ 。假设飞机飞行速度为 90 m/s,四面体扫描转镜在地面相邻两条扫描线之间的垂直距离为 3.62 m,过大的线扫描间距不利于数据处理和地物区分。提高转镜的转动频率虽然可以减小扫描线的垂直距离,但会使激光入射到地面时的扫描光斑出现过采样现象,即减小扫描线的垂直距离和获得合理的光斑采样间距是

矛盾的。

### 3.2 振镜扫描

振镜扫描时,通常由驱动电机直接控制振镜进行高速摆扫运动,从而完成一维扫描,飞机高速运动时,完成另一维度的扫描。实际工作中,振镜的扫描轨迹呈 Z 形分布,扫描原理和扫描路径如图 5 和图 6 所示。其中,扫描视场角为  $2\alpha$ ,飞行高度为  $H$ ,地面激光脚点偏离飞机正下方的距离为  $L$ ,扫描光学角度为  $\psi$ 。

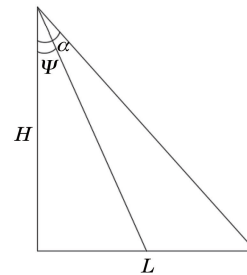


图 5 扫描原理图

Fig. 5 Schematic of the scanning

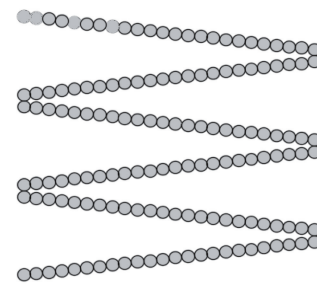


图 6 扫描轨迹示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the scanning trace

忽略飞行时飞机的姿态变化,以振镜一次完整振动的 1/4 周期为例进行分析。假设扫描电机以正弦方式扫描,扫描频率为  $f_{\text{scan}}$ ,1/4 周期对应的光学扫描角度  $\psi$  可表示为<sup>[16]</sup>

$$\psi = \alpha \sin(2\pi f_{\text{scan}} \cdot t), t \in \left[ 0, \frac{1}{4f_{\text{scan}}} \right], \quad (13)$$

地面激光足印偏离飞机正下方的距离可表示为

$$L = H \cdot \tan[\alpha \sin(2\pi f_{\text{scan}} \cdot t)], t \in \left[0, \frac{1}{4f_{\text{scan}}}\right]. \quad (14)$$

可以发现,地面激光脚点偏离飞机正下方的距离  $L$  和时间  $t$  不是一个线形扫描关系,即激光脚点不能在地面上均匀分布。假设电机匀速运动,则

$$\psi = 4f_{\text{scan}} \alpha \cdot t, t \in \left[0, \frac{1}{4f_{\text{scan}}}\right], \quad (15)$$

将(15)式代入(14)式中,得到的激光足印在地面上也不是均匀分布的。如果激光脚点在地面上均匀分布,则激光光斑脚点的速度  $v$  是一个常数,可表示为

$$v = 4f_{\text{scan}} \cdot H \tan \alpha, \quad (16)$$

1/4 周期内,扫描角度  $\theta$  和速度  $v$  的关系为

$$H \tan \psi(t) = v \cdot t, \quad (17)$$

$$\psi(t) = \arctan(4f_{\text{scan}} \cdot \tan \alpha \cdot t), \quad (18)$$

$$t \in \left[0, \frac{1}{4f_{\text{scan}}}\right],$$

电机实际工作时的转动角度应满足

$$\psi_{\text{motor}}(t) = \frac{1}{2} \arctan(4f_{\text{scan}} \cdot \tan \alpha \cdot t), \quad (19)$$

$$t \in \left[0, \frac{1}{4f_{\text{scan}}}\right].$$

高光谱成像 LiDAR 实际采样时,考虑到相邻两个激光脉冲入射到地面时光斑依次有序相连,需使  $\theta \leq 1 \text{ mrad}$ 。扫描视场角  $2\alpha = 30^\circ$  时,得到  $f_{\text{scan}} = 121.72 \text{ Hz}$ 。在该振动频率下,电机难以持续稳定工作,电机的散热难度也较大;且过高的振动频率使振镜摆扫到最大角度时,不能及时减速反转,出现扫描轨迹中间疏、两头密的情况。同时,实际工作中电机的转动角度还需满足正切规律,加大了机载高光谱成像 LiDAR 的工作难度。

### 3.3 圆锥扫描

针对多面体扫描转镜和摆扫振镜出现的问题,提出了圆锥扫描方案,其原理如图 7 所示。扫描镜的转轴与坐标系的  $x$  轴重合,若激光的出射光线与旋转轴的夹角为  $45^\circ$ ,则入射激光的向量坐标可表示为<sup>[11]</sup>

$$\mathbf{I} = [-1 \quad -1 \quad 0]^\top / \sqrt{2}. \quad (20)$$

假设旋转反射镜在零时刻对应的起点为  $y$  轴,电机转动速度为  $\omega$ ,旋转镜转轴的偏置角为  $\gamma$ ,旋转反射镜法线对应的单位向量坐标为

$$\mathbf{N} = [\cos \gamma \quad \sin \gamma \cos \omega t \quad \sin \gamma \sin \omega t]^\top, \quad (21)$$

根据反射定律可得到反射光线

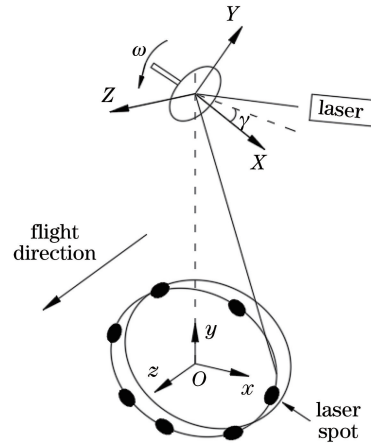


图 7 旋转镜扫描原理图

Fig. 7 Schematic diagram of rotating mirror scanning

$$\mathbf{I}' = \begin{bmatrix} (\cos 2\gamma + \sin 2\gamma \cos \omega t) / \sqrt{2} \\ (\sin 2\gamma \cos \omega t + 2\sin^2 \gamma \cos^2 \omega t - 1) / \sqrt{2} \\ \sqrt{2} (\sin 2\gamma \sin \omega t + \sin^2 \gamma \sin 2\omega t) / 2 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

可将(22)式表示为

$$\begin{bmatrix} m \\ n \\ l \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

式中,  $m, n, l$  分别对  $\mathbf{I}'$  对应的空间矢量分量。假设机载 LiDAR 静止,则 LiDAR 的空间坐标可表示为

$$\mathbf{C}^0 = \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & \sin 45^\circ & 0 \\ -\sin 45^\circ & \cos 45^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

机载飞行高度  $H$  为 500 m,空间坐标系中的平移矢量  $\mathbf{m}^0 = [0 \quad H \quad 0]^\top$ ,机载 LiDAR 在地面坐标系中沿  $Z$  轴以速度  $v$  水平飞行,则地面坐标系中激光足印的坐标为

$$\mathbf{P} = \mathbf{m}^0 + v \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ t \end{bmatrix} + \mathbf{C}^0 \begin{bmatrix} m \\ n \\ l \end{bmatrix}. \quad (25)$$

激光出射光线与旋转轴的夹角为  $45^\circ$  时,为了使 FOV 为  $30^\circ$ ,旋转反射镜的表面与转轴的偏置角需为  $7.5^\circ$ ;当两个相邻脉冲夹角  $\theta \leq 1 \text{ mrad}$  时,转镜的转动频率不超过 10.35 Hz。相比多面体转镜扫描和振镜扫描,在满足设计指标的前提下,圆锥扫描方式更适合高光谱成像 LiDAR,也更容易在工程应用中实现,旋转镜的扫描轨迹如图 8 所示。

实际工作状态下,激光器出射的光线经转镜后呈锥状扫描,伴随着飞机的载体运动,在地物表面形成卵形的螺旋扫描。随着电机转动频率的提高,航

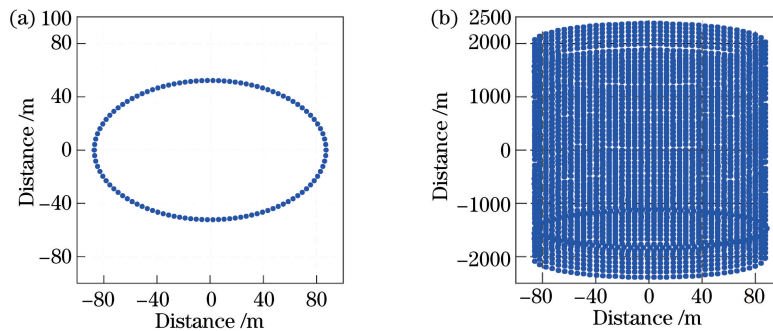


图 8 旋转镜的扫描轨迹图。(a) 单次扫描; (b) 连续扫描

Fig. 8 Scanning trace of the rotating mirror. (a) Single scanning; (b) Continuous scanning

向方向对地物目标的扫描覆盖率也不断扩大。相比线扫描的成像 LiDAR, 圆锥扫描 LiDAR 的光斑脚点密度更高, 采集的有效数据也更多。图 9 为通过软件

得到的旋转扫描镜模型, 其中, 转镜的直径为 310 mm, 转镜外框架和支撑底座材料均为铝合金, 转镜材料为石英玻璃, 建模后转镜的总质量为 24.8 kg。

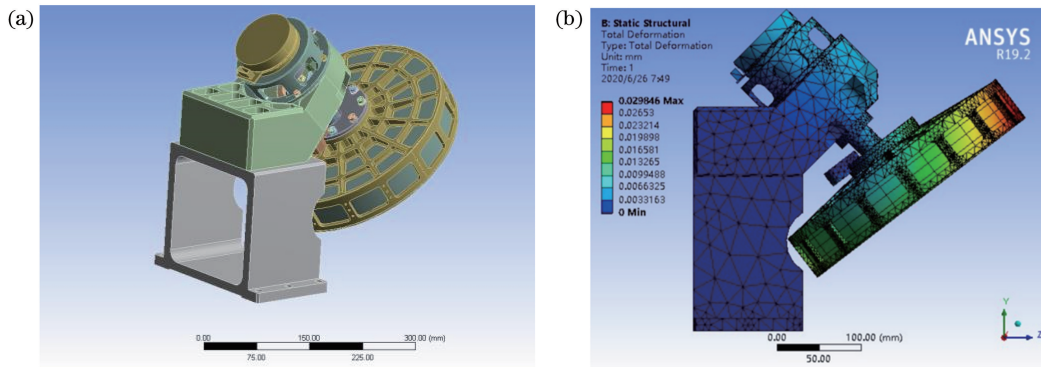


图 9 旋转镜的建模分析。(a) 转镜的三维模型; (b) 仿真结果

Fig. 9 Modeling analysis of the rotating mirror. (a) Three-dimensional model of the rotating mirror; (b) simulation results

机载飞行实验过程中, 在满足激光脉冲入射到地物目标时相邻脚点间的夹角小于 1 mrad 时, 本系统中转镜的转动频率小于 10.35 Hz。模拟分析中, 转镜的转动频率为 600 r/min, 转镜的最大形变量为 0.0298 mm, 对应的形变角度为 0.00552°。理论上光斑并不是从转镜边缘反射到地面, 在满足回波信号反射到转镜中心并被望远镜接收时, 入射光线只需入射在转镜的中心附近位置即可。高光谱成像 LiDAR 在实际飞行时, 因震动导致转镜表面的形变量低于 0.01 mm。当机载飞行高度约为 500 m 时, 地面激光足印光斑脚点的位置偏移量为 0.92 m, 激光脉冲的发散角为 0.3 mrad, 激光脉冲垂直打到地面时, 光斑直径为 0.15 m。转镜的形变会导致激光脚点的位置发生变化, 但相比光斑的直径, 形变导致光线指向性的偏移可以忽略, 因此, 实验中对转镜的材料和参数设计是合理可行的。

## 4 结 论

用多面体转镜扫描地物时, 为了满足  $\theta \leq 1$  mrad, 扫描轨迹中线与线之间的间隔较大。因此, 需要提高转镜的转动频率, 但过高的转动频率会加大控制系统的难度, 也给整机的稳定性带来了挑战。使用振镜方式扫描时, 在满足设计指标的前提下, 振镜的振动频率需达到 121.72 Hz, 该频率下电机难以持续稳定的工作, 也会给电机带来散热难的问题; 且振镜摆扫到最大角度时, 不能及时减速反转, 使扫描光斑出现两头疏、中间密的现象。针对机载 LiDAR 均匀扫描的需求, 通过圆锥扫描方式进行扫描, 并推导了扫描轨迹。结果表明, 在满足设计指标的前提下, 圆锥扫描方式得到的地面激光脚点光斑分布均匀, 对电机转动频率的要求也较低, 降低了转镜在实际工程应用中的难度。目前该扫描方式已经应用到高光谱成像 LiDAR 系统中, 下一步还需进一步分析实验测量得到的数据。

## 参 考 文 献

- [1] Gong W, Sun J, Shi S, et al. Investigating the potential of using the spatial and spectral information of multispectral LiDAR for object classification[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2015, 15(9): 21989-22002.
- [2] Chen B W, Shi S, Sun J, et al. Hyperspectral lidar point cloud segmentation based on geometric and spectral information[J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24043-24059.
- [3] Li D J, Hu X, Zhou K, et al. Synthetic aperture lidar imaging detection based on conformal diffractive optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0428001.  
李道京, 胡焯, 周凯, 等. 基于共形衍射光学系统的合成孔径激光雷达成像探测[J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0428001.
- [4] Chen B W, Shi S, Gong W, et al. Multispectral LiDAR point cloud classification: a two-step approach[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(4): 373.
- [5] Li X L, Zeng J J, Wang H, et al. Design and real-time imaging technology of three-dimensional scanning LiDAR[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 0503004.  
李小路, 曾晶晶, 王皓, 等. 三维扫描激光雷达系统设计及实时成像技术[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(5): 0503004.
- [6] Hong G L, Zhou Y B, Shu R, et al. Lidar for detection of atmospheric Doppler shift based on Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0728002.  
洪光烈, 周艳波, 舒嵘, 等. 基于马赫-曾德尔干涉仪的激光探测大气多普勒频移[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0728002.
- [7] Chen B W, Shi S, Gong W, et al. True-color three-dimensional imaging and target classification based on hyperspectral LiDAR[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(13): 1541.
- [8] Hakala T, Suomalainen J, Kaasalainen S, et al. Full waveform hyperspectral LiDAR for terrestrial laser scanning[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7119-7127.
- [9] Qian L Y, Wu D C, Zhou X J, et al. Radiation calibration and ground object information acquisition based on high spectral imaging lidar system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1128001.  
钱立勇, 吴德成, 周晓军, 等. 高光谱成像激光雷达系统辐射定标和地物信息获取[J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1128001.
- [10] Heiskanen J, Adhikari H, Piironen R, et al. Do airborne laser scanning biomass prediction models benefit from landsat time series, hyperspectral data or forest classification in tropical mosaic landscapes? [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 81: 176-185.
- [11] Zhang D Y. Research on system consistency and optimal states estimation of LiDAR/INS integrated navigation system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.  
章大勇. 激光雷达/惯性组合导航系统的一致性与最优估计问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [12] Xu W M, Liu J, Jiang Z Q, et al. Scanning property analysis and system error calibration of dual galvanometers based multi-points parallel scanning imaging lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0214002.  
徐卫明, 刘军, 姜紫庆, 等. 基于双振镜的多元并扫成像激光雷达的扫描特性分析与系统误差标定[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0214002.
- [13] Ji R Y, Zhao C M, Chen G, et al. Analysis and calculation of scan trace of laser scanning rotation mirror[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(4): 0408003.  
纪荣祎, 赵长明, 陈国, 等. 激光扫描转镜扫描轨迹的分析计算[J]. *中国激光*, 2011, 38(4): 0408003.
- [14] Chen H B. Research on linear array lidar based on 45° scanning rotating mirror [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.  
陈怀波. 基于 45°扫描转镜的线阵激光雷达研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [15] Zhang C, Yue J, Xu Z P, et al. Application of MEMS mirror in compact laser imaging radar [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(9): 1149-1153.  
张驰, 岳娟, 徐正平, 等. MEMS 摆镜在小型化激光成像雷达中的应用[J]. *激光与红外*, 2017, 47(9): 1149-1153.
- [16] Bu H Y, Wang J Y, Shu R, et al. Method of achieving uniform scanning of airborne lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 675-678.  
卜弘毅, 王建宇, 舒嵘, 等. 机载激光雷达均匀扫描的实现方法[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(4): 675-678.