

# 高光谱成像激光雷达系统辐射定标和地物信息获取

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

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院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>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** 提出一种高光谱成像激光雷达系统的光学结构设计, 并对系统的光学辐射定标方法进行研究。利用单色仪对出射光的精细扫描, 确定高光谱成像雷达每个探测通道的带宽和中心波长。根据高光谱成像激光雷达方程, 在实验室定标过程中, 不考虑大气对定标的影响, 得到系统每一个通道的定标系数。系统定标过程中合成不确定度为 0.87%, 扩展不确定度( $k=2$ )为 1.73%。最后对超连续谱高重复频率激光器出射的脉冲能量进行监测, 使该高光谱激光雷达在机载飞行过程中, 依据探测器输出的回波信号强度信息, 能够实时得到地物的反射光谱信息, 进而实现高精度地形获取和地表超精细分类。

**关键词** 遥感; 高光谱激光雷达; 辐射定标; 能量监测; 地物信息

中图分类号 O432

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1128001

## Radiation Calibration and Ground Object Information Acquisition Based on High Spectral Imaging Lidar System

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

<sup>1</sup>Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
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>State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,  
Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China

**Abstract** In this study, an optical structure design and optical radiometric-calibration method for a hyperspectral-imaging lidar system are proposed. Using the proposed method, the central wavelength and bandwidth of each receiving channel were directly determined using a scanning monochromator. The system-calibration coefficients of each channel were measured in the laboratory using the hyperspectral-image lidar equation and excluding the influence of atmosphere extinction. Simulation results show that the synthetic uncertainty is 0.87% and the extended uncertainty ( $k=2$ ) is 1.73%. Furthermore, a novel technique was used to monitor the emitted laser-pulse power in real time during the flight experiment. Based on echo-signal intensity information from the detector, the hyperspectral reflectance of the earth's surface can be accurately retrieved, and the high-precision terrain acquisition and super-fine surface classification can be realized.

**Key words** remote sensing; hyperspectral lidar; radiometric calibration; laser power monitoring; ground object information

**OCIS codes** 280.3640; 220.4830; 280.4788

## 1 引 言

实现对观测目标空间三维信息和光谱信息一体

化获取与识别应用, 是对地观测技术前沿, 也是未来的发展趋势<sup>[1-3]</sup>。目前主要技术手段中, 激光雷达测距可以实现地物目标三维信息获取, 被动高光谱成

收稿日期: 2020-01-09; 修回日期: 2020-02-24; 录用日期: 2020-02-27

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504500)

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

像可以获得丰富的光谱信息,但两种技术手段皆无法实现空间三维信息和光谱信息的同时获取<sup>[4-8]</sup>。为将两个技术优势结合在一起,国内外很多研究机构开展了很多尝试,取得了较好的进展,并基本确认了对地观测激光雷达“单波长-多光谱-高光谱”的发展方向<sup>[9-11]</sup>。然而受高能量超连续谱激光器、微弱信号同步探测等技术瓶颈的制约,高光谱成像激光雷达的发展受到了一定的限制<sup>[12-15]</sup>。

传统激光雷达技术通常采用单波长激光的发射和接收<sup>[16]</sup>,或者多波束激光的发射和接收,其发射激光和接收探测始终是一对一的,而高光谱成像激光雷达通常采用宽谱激光的单发多收机制,这种机制对于成像探测提出了几方面的挑战<sup>[17-23]</sup>:1)对接收信号的精准分光 and 高效耦合提出了极高的要求;2)宽谱激光光源的非线性效应导致激光能量的分布不均,尤其是在短波段的激光能量远弱于现有的单色激光雷达,其回波信号强度甚至在单光子级别;3)探测光谱波段数的增加、弱信号的探测,意味着传统的线阵列、面阵列探测器的带宽、灵敏度、增益不能很好地满足高光谱激光雷达回波信号的光谱数据探测处理要求。因此需要新的系统和方法来解决上述问题。同时,高光谱成像激光雷达使用的光源是高重复频率、超连续谱白光激光器,激光器受到自身发光机制的限制,导致激光器出射的每一发激光脉冲的光谱谱线会发生变化。传统的地基成像激光雷达在对目标物进行扫描时,一般对同一个目标物采取多次扫描的方式,对目标物散射的多次回波信号,一

般采用多次累加后取均值的方法。对回波信号多次累加的过程,也是对激光器发射的激光脉冲光谱谱线取均值的过程。针对机载高光谱成像激光雷达而言,对同一目标物采取激光脉冲多次扫描取均值的方法是无法实现的。

针对目前高光谱激光雷达存在的技术难题<sup>[24-27]</sup>,本课题设计研制了一套高光谱成像激光雷达的光学探测和接收系统。针对激光器脉冲能量的变化,利用光纤从激光器中分离一部分光,并将这部分光作为参考光,实时测量每一发激光脉冲的能量光谱。依据该雷达系统的设计,在实验室不考虑大气条件的情况下,根据高光谱成像激光雷达方程,对系统进行辐射定标<sup>[28-31]</sup>。在雷达机载飞行作业中,推导出适用于类似的多通道高光谱成像激光雷达系统的辐射标定方法,最终得到地物的反射率曲线。

## 2 高光谱成像激光雷达系统和雷达方程

### 2.1 雷达系统

如图1所示,该高光谱成像激光雷达系统主要包括激光器、扫描转镜、接收望远镜、光栅光谱仪、探测器阵列、激光器脉冲能量监测仪等几个部分。系统使用的激光器是超连续谱白光激光器,激光器出射的光线经过分束镜后分为两个部分,一部分入射到扫描转镜后对地物目标进行扫描,一部分作为参考光,通过光纤将参考光耦合进入到探测器,再对每一发激光脉冲的能量进行实时监测。

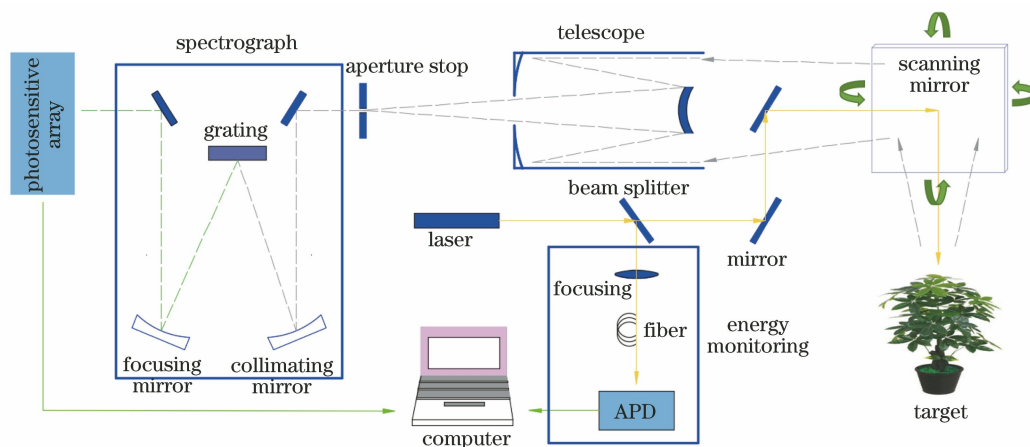


图1 高光谱雷达系统示意图

Fig. 1 Illustration of the hyperspectral lidar system

扫描转镜将激光束反射到地面进行线扫描,回波信号沿同轴光路被望远镜接收。利用离轴抛物面镜作为光学接收望远镜,接收地物目标散射的全波

段激光回波信号,通过小孔光阑限制望远镜的接收视场角,以抑制进入到光栅光谱仪中的背景光信号。通过小孔光阑的回波信号经过光栅分光,将不同波

段的回波信号耦合到相应的探测通道。该雷达系统可以根据探测的需要,将不同波段的回波信号经过光纤耦合到不同的探测器中,从而实现对不同探测通道中心波长和带宽的灵活选择,回波信号光谱范围覆盖 400~900 nm,采集系统实现大于 50 个探测通道数据的快速并行采集,得到待测目标的空间几何信息和光谱信息。

### 2.2 高光谱激光雷达方程

一般来说,激光雷达的回波信号强度主要受到三个方面影响。1)激光雷达的回波信号是由激光束和目标物相互作用所产生的,对于高光谱成像激光雷达来说,也就是目标物的反射率对回波信号强度的影响;2)雷达与目标物之间存在的介质对回波信号的影响,如大气对回波信号的衰减;3)激光雷达的回波信号强度还与雷达系统的配置和系统本身技术方面的因素相关。

如图 2 所示,假设激光器出射的单脉冲能量为  $E_T$ ,系统接收到的回波信号强度为  $P_R$ ,激光器发射一个脉冲信号入射到地物散射体表面,以朗伯体的形式均匀地散射到半球体空间,地物反射率为  $\rho$ ,望远镜的接收孔径(有效通光孔径)为  $D_R$ ,接收系统与地物目标距离为  $z$ ,则

$$P_R = E_T \cdot \frac{\pi (0.5D_R)^2}{2\pi \cdot z^2} \cdot \rho \quad (1)$$

实际过程中,系统本身和大气层对激光脉冲能量存在衰减效应,将系统衰减系数记为  $\eta_{sys}$ ,大气传输因子记为  $\eta_{atm}$ ,则方程变为

$$P_R = E_T \cdot \frac{\pi(0.5D_R)^2}{2\pi \cdot z^2} \cdot \rho \cdot \eta_{sys} \cdot \eta_{atm} \quad (2)$$

多通道高光谱成像激光雷达采用单发多收的工作机制,发射的单脉冲激光信号经过地物目标散射

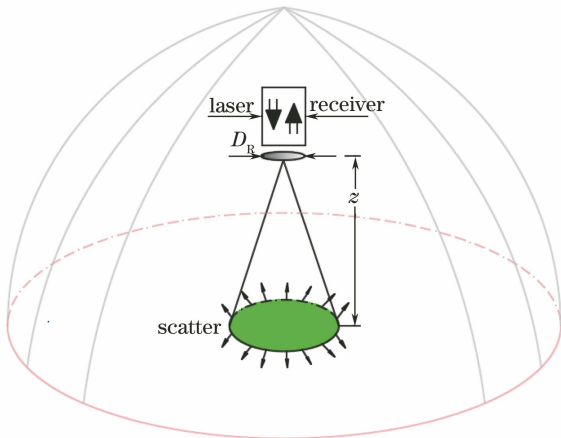


图 2 激光脉冲探测

Fig. 2 Schematic diagram of laser pulse detection

后,接收系统将回波信号通过光栅进行分光,不同波段的回波信号耦合到不同的探测通道。根据高光谱成像激光雷达系统实际的工作模式,多通道高光谱激光雷达方程的回波信号功率可以进一步描述为

$$P_R(\lambda, z) = \rho_0 \eta(\lambda) \Delta\lambda \beta_G(\lambda) \frac{D_R^2}{8z^2} \epsilon(\lambda) [T_{atm}(\lambda, 0, z)]^2 \quad (3)$$

式中: $\lambda$  为光谱标定时得到的各个通道的中心波长  $\lambda_{NCW}$ ;  $P_R(\lambda, z)$  为激光雷达中心波长为  $\lambda$  的通道接收到的回波信号光功率,单位为 W;  $\rho_0$  是激光器输出平均光谱功率密度,单位为 W/nm;  $\eta(\lambda)$  是激光器平均光谱功率密度归一化的功率密度光谱分布函数;  $\Delta\lambda$  是 1 个通道内对应的光谱带宽,单位为 nm;  $\beta_G(\lambda)$  是地物反射率;  $D_R$  的单位为 m;  $z$  是激光雷达与被测地表的距离,单位为 m,  $z$  可以通过测距通道实时测量;  $\epsilon(\lambda)$  是激光雷达系统的光学效率;  $T_{atm}(\lambda, 0, z)$  是激光雷达与被测地表之间的大气在波长  $\lambda$  处的透过率。高光谱成像激光雷达的最终目的是得到最真实的地物反射信息,即(3)式中的  $\beta_G(\lambda)$ ,因此需要将  $\beta_G(\lambda)$  从上述方程中求解出来。

### 3 高光谱成像激光雷达系统标定方法

高光谱成像激光雷达作为一种全新的对地观测技术,相较于传统的单波长激光雷达,高光谱激光雷达的重要测量目标之一就是获取地表的反射光谱信息<sup>[32]</sup>。然而,将高光谱激光雷达系统测量获得的光谱信息应用于地物分类等任务前,需要对雷达系统本身的光谱强度进行校正<sup>[33-34]</sup>。系统的标定对于高光谱激光雷达数据的应用是非常重要的<sup>[35]</sup>。

#### 3.1 光谱标定

本系统的光谱分辨率,与传统光谱分辨仪器各个通道光谱均匀分布的特性不同,其采用了多光纤分光技术,故系统各通道光谱分辨率需单独标定,光谱分辨率由各个光谱通道下的通带宽度决定,通常由半峰全宽来描述。

对于传统的多通道激光雷达系统,为了确定各个通道的带宽和中心波长,一般采用已知响应度的探测器对各个通道进行标定,对于高光谱激光雷达系统而言,由于光谱范围较宽,对探测器的要求较高,故其在工程应用中的成本较高,对实验室标定的难度较大。

如图 3 所示,光谱标定系统包括电源、卤灯光源、单色仪、探测器、信号处理系统。单色仪的波长

精度为 0.2 nm,光谱分辨率也为 0.2 nm,该系统的光谱范围覆盖 400~900 nm,单色仪从 400 nm 开始,依次输出 400.0,400.2,400.4, ..., 900.0 nm,每隔 0.2 nm 输出一次光能量。采用分束镜同步测量的方法,降低光源的不稳定性影响,提高测量精度和效率。光线进入单色仪后,出射的单色光经过分束镜分束:一部分经过探测器耦合,直接测量出电流

值,记作  $I_{400.0}, I_{400.2}, I_{400.4}, \dots, I_{900.0}$ ;另一部分能量通过雷达系统的扫描转镜进入雷达系统,通过光栅分光和后继耦合光路系统入射到相应探测器的靶面,最终在终端的处理系统中得到测量的电流信号值,记作  $I'_{400.0}, I'_{400.2}, I'_{400.4}, \dots, I'_{900.0}$ 。同时,依据单色仪输出的能量在对应探测器上的响应,确定各个通道的光谱范围。

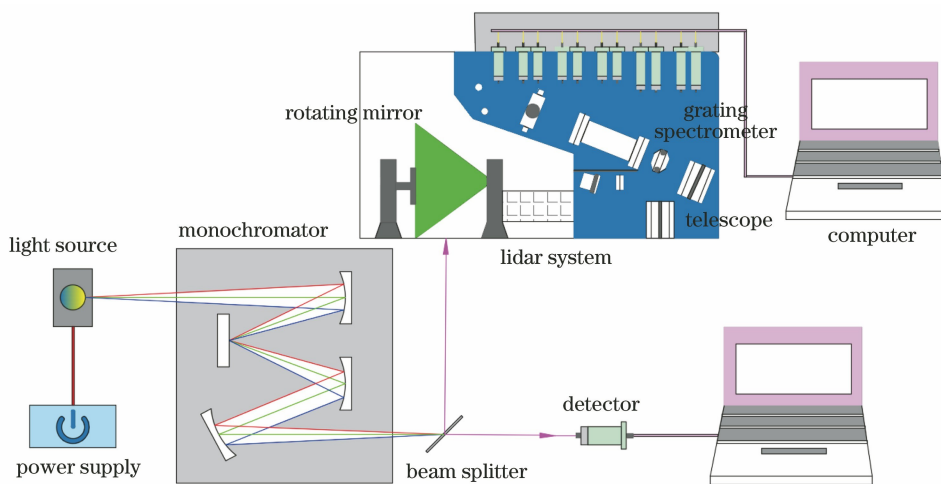


图 3 光谱标定示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spectral calibration

如图 4 所示,本文采取电流比值的方法确定每个通道的中心波长。根据探测器的响应,确定各个通道的光谱范围,将系统测量得到的信号强度除以探测器测量的信号强度,来消除单色仪出射光线的能量波动对光谱标定的影响,最终得到该通道内相应波长对应的电流信号比值  $I'/I$ 。理想情况下,电信号比值最大的点  $(I'/I)_{\max}$  对应的波长定义为该通道的中心波长  $\lambda_{\text{NCW}}$ 。同时,半峰全宽  $\Delta\lambda$  定义为该通道内的带宽,即该通道内的光谱分辨率。

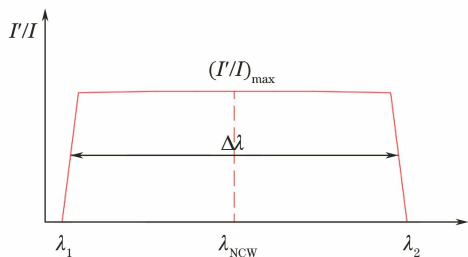


图 4 带宽、中心波长示意图

Fig. 4 Schematic diagram of bandwidth and center wavelength

### 3.2 辐射标定

为了得到最真实的地物后向散射辐射光谱,系统本身传感器输出的能量数据受激光发射能量、真实地物反射光谱、系统本身透过率、大气条件等因素

的相互影响,因此需要对系统进行辐射标定,以确定各个通道的标定系数。

激光器出射的激光脉冲经过转镜到达地物散射后,系统探测器靶面接收到的光功率为

$$P_R(\lambda, z) = \rho_0 \eta(\lambda) \Delta\lambda \beta_G(\lambda) \frac{D_R^2}{8z^2} \epsilon(\lambda) [T_{\text{atm}}(\lambda, 0, z)]^2, \quad (4)$$

接收系统将回波信号的强弱以电信号  $I(\lambda)$  的形式反馈,在探测器线性工作的区间内,光功率和电信号呈一定的线性关系,可以表示为:  $I(\lambda) = P_R(\lambda) \cdot R$ ,其中  $R$  为探测器在线性范围内工作的响应度。

依据高光谱激光雷达方程,为了精确得到最真实的地物反射光谱  $\beta_G(\lambda)$ ,需要综合考虑影响地物信息的各个因素。其中,高重复频率激光器每一发脉冲的能量变化就是一个非常重要的因素。因此,在辐射标定的过程中需要对激光器出射的每一发激光脉冲能量进行监测。

如图 5 所示,为了校正超连续谱、高重复频率激光器输出的激光光谱的变化对高光谱激光雷达测量的光谱数据的影响,从激光器中分出一束参考激光,利用高光谱激光雷达本身的光学接收和探测系统,对超连续谱激光器发射的每一发激光脉冲的光谱进行监测。激光器的输出窗口有大约小于 0.1% 的光

被透射,将该透射光作为参考光,耦合到芯径为 200  $\mu\text{m}$  的多模光纤中并导出激光器。在转镜和接收望远镜之间的遮光筒部分,将参考光耦合到接收望远镜的离轴反射镜上,经过小孔光阑入射到准直离轴抛物面镜后到达后继光路系统。同时,这样的设计降低了杂散光线对系统标定精度的影响。

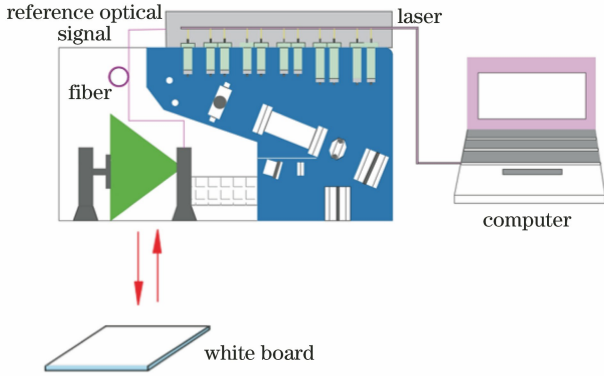


图 5 辐射标定示意图

Fig. 5 Schematic diagram of radiation calibration

参考光通过时序控制采集卡采集的信号强度。参考光通过系统后,探测器靶面接收到的光功率为

$$P_{\text{Ref}}(\lambda) = \rho_0 \eta(\lambda) \Delta\lambda \epsilon(\lambda) R(\lambda), \quad (5)$$

式中: $R(\lambda)$ 是参考激光在引入过程中的光效率,会受到分束镜的透过率、光纤透过率、耦合效率等因素影响。各个通道内的探测器输出的电流值记作  $I'_{\text{Ref}}(\lambda)$ ,  $I'_{\text{Ref}}(\lambda)$  可以表示为:  $I'_{\text{Ref}} = P_{\text{Ref}}(\lambda) \cdot R$ , 其中  $R$  是对应通道内探测器的响应度。

利用角反射器,将部分激光引入到光学接收探测系统中,接收到的激光功率谱为

$$P_{\text{Cor}}(\lambda) = \rho_0 \eta(\lambda) \Delta\lambda \epsilon(\lambda) Q(\lambda) = \frac{I_{\text{Cor}}(\lambda)}{R}, \quad (6)$$

式中: $Q(\lambda)$ 是利用角反射器反射的光效率,可以准确测量; $I_{\text{Cor}}(\lambda)$ 是利用角反射器反射的激光脉冲信号在各个通道对应的电流信号值。实验室标定时,利用角反射器将经过转镜的激光脉冲信号,直接耦合到雷达系统中。因此,将(5)式和(6)式相比较可得

$$\frac{P_{\text{Ref}}(\lambda)}{P_{\text{Cor}}(\lambda)} = \frac{R(\lambda)}{Q(\lambda)} = \frac{I_{\text{Ref}}(\lambda)}{I_{\text{Cor}}(\lambda)}, \quad (7)$$

即可得到参考激光在引入过程中的光效率  $R(\lambda)$ , 将其代入到(5)式中,从参考激光功率谱中可得

$$C(\lambda) = \rho_0 \eta(\lambda) \Delta\lambda \epsilon(\lambda) = \frac{I_{\text{Ref}}(\lambda)}{R(\lambda)R}. \quad (8)$$

将(8)式代入高光谱激光雷达方程,可得地物反射率谱线为

$$\beta_G(\lambda) = \frac{8z^2}{D_R^2} \frac{P_R(\lambda, z)}{C(\lambda) [T_{\text{atm}}(\lambda, 0, z)]^2}. \quad (9)$$

在实际的地物反射谱线中,系统本身的背景噪声对反射谱线  $\beta_G(\lambda)$  也会造成影响,需要对系统的噪声进行扣除。如图 6 所示,在一个脉冲的重复频率内,采集卡需要采集三次信号强度,分别是检测脉冲能量变化的参考光强度  $I_{\text{Ref}}(\lambda)$ 、经过地物反射后的回波信号强度  $I'(\lambda)$ 、系统本身的背景噪声  $I_{\text{BG}}(\lambda)$ 。激光器重复频率为 130 kHz,一个脉冲的周期  $T = 7.69 \times 10^{-6}$  s;参考光通过光纤耦合到雷达系统中,光纤束的长度设计为 100 m,则  $t_1 = 3.3 \times 10^{-7}$  s。接收系统通过时序控制采集卡采集参考光强度,通过电平控制采集卡采集回波信号强度,在探测器的响应范围内,我们可以直接区分这三个信号。

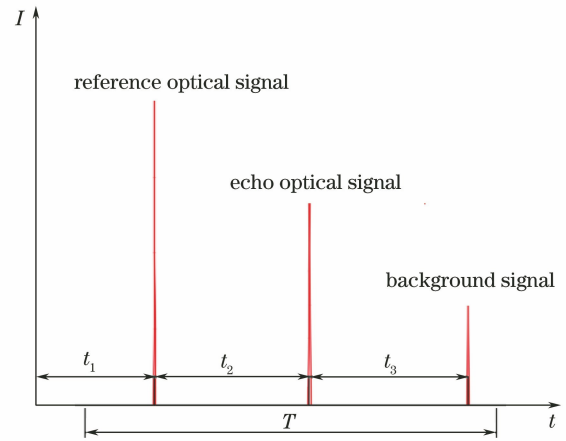


图 6 参考光、回波信号、背景噪声示意图

Fig. 6 Schematic diagram of reference optical signal, echo optical signal and background signal

雷达系统在没有激光脉冲信号时,接收系统中探测器输出的强度信息为系统的背景噪声。在一个激光脉冲周期内,接收系统各个通道实际输出的回波信号强度  $I'(\lambda)$ ,包括真实的地物信号强度  $I(\lambda)$  和系统的背景噪声  $I_{\text{BG}}(\lambda)$ 。雷达系统在实际的机载飞行试验时,接收系统各个通道的探测器实际输出的信号  $I'(\lambda)$  为

$$I'(\lambda) = I(\lambda) + I_{\text{BG}}(\lambda), \quad (10)$$

将(10)式代入到(9)式中,可得

$$\beta_G(\lambda) = \frac{8z^2}{D_R^2} \frac{[I'(\lambda) - I_{\text{BG}}(\lambda)] \cdot R(\lambda)}{I_{\text{Ref}}(\lambda) \cdot [T_{\text{atm}}(\lambda, 0, z)]^2}. \quad (11)$$

实验室标定时,不考虑大气透过率对系统标定的影响。此时,将(11)式进一步简化,得

$$\beta_G(\lambda) = \frac{8z^2}{D_R^2} \frac{[I'(\lambda) - I_{\text{BG}}(\lambda)] \cdot R(\lambda)}{I_{\text{Ref}}(\lambda)}. \quad (12)$$

为了确定接收望远镜的有效通光孔径  $D_R$ ,将

标准的漫反射白板当作地物目标,将雷达系统出射的激光脉冲入射到标准的漫反射白板上,雷达系统与白板之间的距离是已知的,分别测量出系统各个通道的回波信号电流值  $I'(\lambda)$ 、参考光电流值  $I_{\text{Ref}}(\lambda)$ 、背景噪声电流值  $I_{\text{BG}}(\lambda)$ ,即可得到系统接收望远镜的有效通光孔径  $D_{\text{R}}$ ,进一步得到系统各个通道的标定系数  $C_{\text{Cal}}(\lambda)$  为

$$C_{\text{Cal}}(\lambda) = \frac{R(\lambda)}{D_{\text{R}}^2} \quad (13)$$

将(13)式代入到(11)式中,得到系统在机载飞行过程中,实际的地物反射谱  $\beta_{\text{G}}(\lambda)$  为

$$\beta_{\text{G}}(\lambda) = \frac{[I'(\lambda) - I_{\text{BG}}(\lambda)] \cdot 8z^2 \cdot C_{\text{Cal}}(\lambda)}{[T_{\text{atm}}(\lambda, 0, z)]^2 I_{\text{Ref}}(\lambda)} \quad (14)$$

雷达系统在实际机载飞行的工作过程中,大气透过率主要受到大气分子消光系数和气溶胶消光系数的共同影响。机载飞行过程中,大气分子消光系数可以基于标准大气模型和地面气象观测站计算得到,而气溶胶的消光系数可以通过高光谱激光雷达全波形波段的信号进行反演。实际在计算可见光波段内大气消光系数时,近地层大气分子消光系数在大气消光系数中占据的权重很小,气溶胶的消光系

数是引起低层消光系数的主要原因。

机载高光谱激光雷达在空中飞行工作时,飞行高度  $z$  由测距通道实时测量得到。依据一个激光脉冲周期时间内,各个通道探测器实际输出的信号强度  $I'(\lambda)$ 、参考光强度  $I_{\text{Ref}}(\lambda)$ 、背景噪声强度  $I_{\text{BG}}(\lambda)$ ,同时依据实际的回波信号反演得到大气透过率  $T_{\text{atm}}(\lambda, 0, z)$ ,结合每一个探测通道的标定系数  $C_{\text{Cal}}(\lambda)$ ,代入(14)式中即可得到各个通道的中心波长  $\lambda$  和  $\beta_{\text{G}}(\lambda)$  的对应关系,可实时覆盖高光谱激光雷达宽谱段范围内的地物反射光谱信息。

## 4 不确定度分析

根据国家计量单位发布的测量不确定度评估和表示规范<sup>[36]</sup>,对高光谱成像激光雷达系统的光谱标定和辐射标定方法进行评价,定标过程中不确定度的来源主要包括定标装置、探测器两个部分,其中:定标装置的不确定度来源主要包括单色仪光源的波长精度、非稳定性、平面非均匀性和角度非均匀性,探测器的不确定度来源主要包括响应度、稳定性、非线性、非均匀性等因素<sup>[37]</sup>。整个标定过程的不确定度评估如表 1 所示。

表 1 雷达系统标定的不确定度

Table 1 Uncertainty of lidar system calibration

Component of uncertainty		Contribution / %
Source's characterization	Wavelength accuracy	—
	Instability	0.500
	Planar uniformity	0.400
	Angular uniformity	0.570
Detector's characterization	Radiant power responsivity	0.100
	Instability	0.018
	Non-linearity	0.070
	Non-uniformity	0.016
Combined uncertainty		0.87
Expanded uncertainty ( $k=2$ )		1.73

系统标定的不确定度按照通用的不确定度评价公式<sup>[38]</sup>进行计算,即

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \quad (15)$$

式中: $u_n$  表示第  $n$  个不确定因素引起的不确定度。根据公式计算得到系统标定过程中合成不确定度为 0.87%,扩展不确定度( $k=2$ )为 1.73%。光谱标定时,光源的输出波长由单色仪决定,波长精度为 0.2 nm,该项误差的不确定度可以忽略,其中标定光源的不确定度为 0.86%,探测器的不确定度为 0.12%,由不确定度评估可知,定标光源引入的不确定

度占主导地位,通过改进光源的性能<sup>[39]</sup>,有望进一步降低系统标定的不确定度。

## 5 结 论

提出一种主动式高光谱激光雷达光谱标定和辐射标定的方法,依据单色仪输出能量对各个通道探测器的响应,确定各个通道的光谱范围;依据各个通道探测器电流的比值,计算得到各个通道的带宽和中心波长。考虑到高重复频率激光器能量的波动,在激光器发射端分出一束参考光,实时对每一发脉

冲能量进行监测。根据高光谱激光雷达方程,解出了每一个探测通道的标定系数  $C_{\text{Cal}}(\lambda)$ ,依据地物反射率  $\beta_G(\lambda)$ 与测量值  $I'(\lambda)$ 、 $I_{\text{Ref}}(\lambda)$ 、 $I_{\text{BG}}(\lambda)$ 和标定系数  $C_{\text{Cal}}(\lambda)$ 的对应关系,可以得到真实的地物反射率  $\beta_G(\lambda)$ 与各个通道中心波长  $\lambda$ 的对应关系。该方法在系统标定的过程中,合成不确定度为 0.87%,扩展不确定度( $k=2$ )为 1.73%。

该方法可以用于类似多通道的高光谱成像激光雷达系统的光谱标定和辐射标定,可以直接实现对地物目标空间三维信息和光谱信息的一体化获取与识别应用,对于遥感领域类似的高光谱成像激光雷达系统的标定和地物信息获取具有一定的借鉴意义。

### 参 考 文 献

- [1] Wang J, Yuan M, Chen N, et al. Continuous tunable cavity Fabry-Perot interferometer by using potassium dideuterium phosphate with two ring electrodes[J]. Applied Optics, 2019, 58(16): 4425-4430.
- [2] Pham T D, Xia J S, Ha N T, et al. A review of remote sensing approaches for monitoring blue carbon ecosystems: mangroves, seagrasses and salt marshes during 2010—2018[J]. Sensors, 2019, 19(8): 1933.
- [3] Wang W, Chen F S. Design of baffle of imaging system for earth observation on geostationary earth orbit[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 0916001.  
王威, 陈凡胜. 静止轨道对地观测成像系统外遮光罩设计[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0916001.
- [4] Dalponte M, Bruzzone L, Gianelle D. Fusion of hyperspectral and LIDAR remote sensing data for classification of complex forest areas [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(5): 1416-1427.
- [5] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. Applied Optics, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [6] He L, Song X, Feng W, et al. Improved remote sensing of leaf nitrogen concentration in winter wheat using multi-angular hyperspectral data[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 174: 122-133
- [7] Cendrero-Mateo M P, Moran M S, Papuga S A, et al. Plant chlorophyll fluorescence: active and passive measurements at canopy and leaf scales with different nitrogen treatments [J]. Journal of Experimental Botany, 2016, 67(1): 275-286.
- [8] Grönwall C, Steinvall O, Göhler B, et al. Active and passive imaging of clothes in the NIR and SWIR regions for reflectivity analysis[J]. Applied Optics, 2016, 55(20): 5292-5303.
- [9] Mura M D, Prasad S, Pacifici F, et al. Challenges and opportunities of multimodality and data fusion in remote sensing[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(9): 1585-1601.
- [10] Lee Z, Shang S L, Du K P, et al. Enhance field water-color measurements with a Secchi disk and its implication for fusion of active and passive ocean-color remote sensing[J]. Applied Optics, 2018, 57(13): 3463-3473.
- [11] Hui Z Y, Wu B P, Hu Y J, et al. Improved progressive morphological filter for digital terrain model generation from airborne lidar data [J]. Applied Optics, 2017, 56(34): 9359-9367.
- [12] Saleh A, Aalto A, Ryzkowski P, et al. Short-range supercontinuum-based lidar for temperature profiling [J]. Optics Letters, 2019, 44(17): 4223-4226.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Yan Q, Yuan M, He T T, et al. Pulse laser frequency locking method based on molecular absorption[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1028005.  
闫庆, 袁萌, 何甜甜, 等. 基于分子吸收的脉冲激光锁频方法研究 [J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1028005.
- [16] Lim K, Treitz P, Wulder M, et al. LiDAR remote sensing of forest structure[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2003, 27(1): 88-106.
- [17] Asner G P. Carnegie airborne observatory: in-flight fusion of hyperspectral imaging and waveform light detection and ranging for three-dimensional studies of ecosystems[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2007, 1(1): 013536.
- [18] Dalponte M, Bruzzone L, Gianelle D. Tree species classification in the Southern Alps based on the fusion of very high geometrical resolution multispectral/hyperspectral images and LiDAR data [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 123: 258-270.
- [19] Chen Y W, Räikkönen E, Kaasalainen S, et al. Two-

- channel hyperspectral LiDAR with a supercontinuum laser source[J]. *Sensors*, 2010, 10(7): 7057-7066.
- [20] Puttonen E, Suomalainen J, Hakala T, et al. Tree species classification from fused active hyperspectral reflectance and LIDAR measurements [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260 (10): 1843-1852.
- [21] Chen, Shi, Gong, et al. True-color three-dimensional imaging and target classification based on hyperspectral LiDAR[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11 (13): 1541.
- [22] Du L, Gong W, Shi S, et al. Estimation of rice leaf nitrogen contents based on hyperspectral LIDAR[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 44: 136-143.
- [23] 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*, 2015, 15 (9): 21989-22002.
- [24] Belgiu M, Drăguț L. Random forest in remote sensing: a review of applications and future directions [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 114: 24-31.
- [25] Hakala T, Suomalainen J, Kaasalainen S, et al. Full waveform hyperspectral LiDAR for terrestrial laser scanning[J]. *Optics Express*, 2012, 20 (7): 7119-7127.
- [26] 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.
- [27] Feng L, Wei L D, Yang L, et al. Design of double-channel hyperspectral imaging system based on curved prism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0511002.  
冯蕾, 魏立冬, 杨雷, 等. 双通道曲面棱镜高光谱成像系统设计[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0511002.
- [28] Wagner W, Ullrich A, Ducic V, et al. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 60(2): 100-112.
- [29] Brell M, Segl K, Guanter L, et al. Hyperspectral and lidar intensity data fusion: a framework for the rigorous correction of illumination, anisotropic effects, and cross calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55 (5): 2799-2810.
- [30] Dery B, Buteau S, Simard J R, et al. Spectroscopic calibration correlation of field and lab-sized fluorescence LIDAR systems[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48 (9): 3580-3586.
- [31] Meng X, Li L G, Han S L, et al. High dynamic near infrared spectrometer based on quasi Littrow structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37 (10): 1030002.  
孟鑫, 李立功, 韩顺利, 等. 基于准 Littrow 结构的高动态近红外光谱仪研究 [J]. *光学学报*, 2017, 37 (10): 1030002.
- [32] Ceolato R, Riviere N, Hespel L. Reflectances from a supercontinuum laser-based instrument: hyperspectral, polarimetric and angular measurements[J]. *Optics Express*, 2012, 20 (28): 29413-29425.
- [33] Cook B, Corp L, Nelson R, et al. NASA goddard's LiDAR, hyperspectral and thermal (G-LiHT) airborne imager[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5 (8): 4045-4066.
- [34] Kaasalainen S, Lindroos T, Hyypä J. Toward hyperspectral lidar: measurement of spectral backscatter intensity with a supercontinuum laser source [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(2): 211-215.
- [35] Li W, Niu Z, Sun G, et al. Deriving backscatter reflective factors from 32-channel full-waveform LiDAR data for the estimation of leaf biochemical contents[J]. *Optics Express*, 2016, 24 (5): 4771-4785.
- [36] National metrology technical committee of legal metrology administration. Evaluation and Expression of Uncertainty in measurement: JJF 1059.1—2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.  
全国法制计量管理计量技术委员会. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [37] Xie C Y, Zhai W C, Li J J, et al. Absolute radiance responsivity calibration based on supercontinuum laser and monochromator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0714002.  
谢臣瑜, 翟文超, 李健军, 等. 基于超连续激光-单色仪的绝对辐亮度响应度定标 [J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0714002.
- [38] Borraccino A, Courtney M, Wagner R. Generic methodology for field calibration of nacelle-based wind lidars[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(11): 907.
- [39] Yamaguchi Y, Yamada Y, Ishii J. Supercontinuum-source-based facility for absolute calibration of radiation thermometers [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2015, 36(8): 1825-1833.