

斜程能见度探测的米-拉曼散射扫描型激光雷达研制

李仕春^{1,2*}, 任腾¹, 王旭¹, 王玉峰^{1,2}, 辛文辉^{1,2}, 华灯鑫^{1,2**}¹西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;²陕西省现代装备绿色制造协同创新中心, 陕西 西安 710048

摘要 针对飞机起降安全的斜程能见度探测问题, 研制了一台 4 通道的米-拉曼散射扫描型激光雷达, 可实现双波长无假定的大气消光系数廓线反演, 进而可精细探测大气斜程能见度。基于大气能见度理论, 假设观测路径附近无光源且忽略气溶胶粒子谱分布影响, 分析了采用大气平均消光系数反演斜程能见度的有效性。该激光雷达采用 Nd:YAG 激光器的基频(1064 nm)和三倍频(355 nm)激光脉冲作为光源, 采用以二向色镜和窄带干涉滤光片为核心的拉曼光谱分光系统, 利用有限状态机理论和多线程并发技术实现多模块协同控制软件。结合侧向散射型能见度仪, 开展初步观测实验与分析。结果表明, 当天气为多云转阴, 地面水平能见度为 9 km, 俯仰角为 26°时, 所研制系统累积观测 4 min 的有效探测距离优于 11 km, 近地面分析结果取得了很好的一致性。

关键词 传感器; 激光雷达; 斜程能见度; 大气消光系数; 拉曼光谱分光; 有限状态机

中图分类号 TN958.98; P427.2+4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1228001

Development of Mie-Raman Scattering Scanning Lidar for Probing Slant Visibility

Li Shichun^{1,2*}, Ren Teng¹, Wang Xu¹, Wang Yufeng^{1,2}, Xin Wenhui^{1,2}, Hua Dengxin^{1,2**}¹School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;²Collaborative Innovation Centre for Modern-Equipment Environmentally-Conscious Manufacturing of shaanxi province, Xi'an 710048, Shaanxi, China

Abstract Aiming at the problem of slant visibility detection for safe take-off and landing of aircraft, a 4-channel Mie-Raman scattering scanning lidar is developed to achieve the dual-wavelength assumption-free retrieval of the atmospheric extinction coefficient profile, and then to finely obtain atmospheric slant visibility. Based on the atmospheric visibility theory, assuming that there is no light source near the observation path and ignoring the influence of aerosol particle spectrum distribution, the effectiveness of using atmospheric mean extinction coefficient to retrieve slant visibility is analyzed. This lidar utilizes the fundamental frequency (1064 nm) and triple frequency (355 nm) laser pulses of the Nd:YAG laser as the light source, adopts the Raman polychromator with dichroic mirrors and narrow-band interference filters, and uses the finite state machine theory and multi-thread concurrency technique to realize the multi-module collaborative control software. Combined with the side-scattering visibility meter, the preliminary observation experiments and comparative analysis are carried out. The results show that when the weather is cloudy to overcast, the ground horizontal visibility is 9 km and the pitch angle is 26°, the effective detection distance of this system within 4 min cumulative time is better than 11 km, and the near-ground analysis results are in good agreement.

Key words sensors; lidar; slant visibility; atmospheric extinction coefficient; Raman polychromator; finite state machine

收稿日期: 2021-08-30; 修回日期: 2021-10-17; 录用日期: 2021-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(U1733202, 62175199, 61875162)、陕西省自然科学基金(2020JM-445)、陕西省教育厅自然科学基金(20JY048)

通信作者: *lsczqz@xaut.edu.cn; **dengxinhua@xaut.edu.cn

1 引言

大气能见度是表征大气对视觉影响的物理量,若忽略人眼生理视觉特征的影响,则基于亮度对比的大气能见度就成为大气透明程度和光学状态的重要指标^[1]。依据观测路径大气状态的均匀性,大气能见度可分为水平能见度(通常假设大气水平分布均匀)和斜程能见度。水平能见度已成为气象领域中的常规观测量^[2],而斜程能见度在空间目标探测领域尤为重要,如航空领域中飞机安全起降问题,需要准确测量飞机起飞和着陆航道上的斜程能见度^[3]。由于大气状态的随机性与多变性,故斜程能见度实时探测已成为研究的热点问题^[4]。

大气能见度测量主要有直接测量法和间接反演法,直接测量法主要有目测法^[4]和照相法^[5],间接反演法主要有气溶胶采样法^[6]和光学参数测量法。光学参数测量法已成为目前大气能见度观测的主要手段,主要有透射式能见度仪^[6]和散射式能见度仪^[7](包含后向散射式能见度仪,即激光雷达能见度仪^[8-9])。然而,目前研究大多集中于水平能见度的观测。随着后向散射式激光雷达技术的飞速发展,其在斜程能见度领域的测量能力日益得到研究者的关注。

大气斜程能见度测量的主要影响因素有人眼的生理视觉特征、目标与背景的光学特性、观测路径大气柱的光学特性,以及大气消光系数的分布等^[1,4]。观测路径大气柱的光学特性主要受太阳天顶角、观测视角和大气状态等因素影响,可通过大气辐射传输方程进行仿真分析^[10-11]。大气消光系数分布依赖于激光雷达的实际观测。目前研究者大多利用可见光波段的米散射激光雷达开展大气能见度的观测和算法优化分析^[8,12-16],其反演的大气消光系数廓线准确性受限于系统重叠因子、迭代边界设定和激光雷达比假定。采用米-拉曼散射激光雷达系统的相关研究受限于高功率激光器的系统集成限制,进而不具备扫描功能^[5,17-18]。因此,针对飞机起降安全的斜程能见度探测问题,研制米-拉曼散射扫描型激光雷达开展大气能见度探测的研究鲜有报道。

基于大气气溶胶粒子和分子的米散射和振动拉曼散射原理,考虑机场可见光遥感限制的实际需求,采用高眼安全阈值的 Nd:YAG 激光器的基频(1064 nm)和三倍频(355 nm)激光脉冲作为光源,成功研制了 4 通道米-拉曼散射扫描型激光雷达。利用上下位机控制结构控制收发装置的水平 360°和俯仰±40°二维电控扫描,利用有限状态机理论和

多线程并发技术,实现数据采集模块、扫描控制模块、高压控制模块、激光控制模块、数据处理模块和数据存储模块等多模块协同控制软件,以及 4 通道 40 MSa/s 的 16 bit 模拟数据采集、处理与显示,以实现双波长无激光雷达比假定的大气消光系数廓线反演,进而开展精细的大气斜程能见度观测研究。

2 大气能见度探测原理

大气能见度分析的目的在于透过大气观测目标物时能够从背景中有效识别出目标物,依据 Purkinje 理论,物体和背景的亮度差异是大气能见度理论的核心因素。因此,通常将大气透过前后的亮度差异分别定义为固有亮度对比 C_0 和视亮度对比 C_L ^[3],二者的表达式为

$$C_0 = \frac{|B_{b,0} - B_{t,0}|}{\max(B_{b,0}, B_{t,0})}, \quad (1)$$

$$C_L = \frac{|B_{b,L} - B_{t,L}|}{\max(B_{b,L}, B_{t,L})}, \quad (2)$$

式中: $B_{t,0}$ 和 $B_{b,0}$ 分别为目标和背景的固有光亮度; $B_{t,L}$ 和 $B_{b,L}$ 分别为目标和背景的视光亮度; L 为观测点与目标物之间的大气路径长度; $\max(\cdot)$ 为取最大值函数。

考虑大气消光导致的目标物光亮度的减弱效应和观测方向大气柱发光导致的光亮度增强效应,将目标物和背景的视亮度表示为

$$B_{t,L} = B_{t,0} T_L + D_L, \quad (3)$$

$$B_{b,L} = B_{b,0} T_L + D_L, \quad (4)$$

式中: T_L 和 D_L 分别为长度为 L 的观测路径的大气透过率和气柱亮度,二者表达式^[3]为

$$T_L = \exp\left[-\int_0^L \alpha(l) dl\right], \quad (5)$$

$$D_L = \int_0^L J(l) T_l dl, \quad (6)$$

式中: T_l 为长度为 l 的观测路径的大气透过率; $\alpha(l)$ 为沿观测方向距离观测点 l 处大气微元的消光系数; $J(l)$ 为相应大气微元向观测点方向发射的散射光亮度(源函数),其表达式^[3]为

$$J(l) = \frac{1}{4\pi} E(l) P(l) \beta(l), \quad (7)$$

式中: $E(l)$ 、 $\beta(l)$ 和 $P(l)$ 分别为相应大气微元的光照度、散射系数和散射相函数。若观测大气路径 l 上的光照度均匀,则 $E(l)$ 为常数。若观测路径附近有光源或较强的反射体,如不均匀云层等,会导致复杂的气柱照明,则 $E(l)$ 不为常数,需要通过大气传输方程进行分析^[11]。

观测中通常是从较亮背景中提取较暗目标物, 即 $B_{t,0} < B_{b,0}$, 式(2)可表示为

$$C_L = \frac{|B_{b,L} - B_{t,L}|}{B_{b,L}} = \frac{B_{b,0} T_L}{B_{b,0} T_L + D_L} C_0 = Y_L C_0, \quad (8)$$

式中: Y_L 为亮度对比传输函数, 反映了光亮度在大气中传输时固有对比的变化情况, 可表示为

$$Y_L = \frac{B_{b,0} T_L}{B_{b,0} T_L + D_L} = \frac{B_{b,0}}{B_{b,L}} T_L, \quad (9)$$

可以看出, 只要观测路径的大气柱存在发光, 即 $D_L > 0$, 则 $Y_L < 1$ 。当目标物处的背景亮度与观测点的背景亮度一致时, 即 $B_{b,0} = B_{b,L}$ 时, $Y_L = T_L$ 。此时, 大气柱发光导致的光亮度增强效应恰好能抵消大气消光导致的光亮度减弱效应。例如, 在水平均匀大气中, 当气柱发光只考虑大气天空散射光时, 可满足该条件, 进而得到常见的水平能见度参数, 即水平能见度, 其表达式为

$$V_\epsilon = -\frac{\ln \epsilon}{\alpha}, \quad (10)$$

式中: ϵ 为亮度对比阈值, 可取 0.02 或 0.05; α 为消光系数。通常选择人眼最敏感的 550 nm 波长作为能见度的评价波长, 因此需要考虑消光系数 α 对波长的依赖性^[8], 即式(10)通常表示为

$$\alpha = \frac{-\ln \epsilon \left(\frac{550}{\lambda_L}\right)^q}{V_\epsilon}, \quad (11)$$

式中: λ_L 为激励波长, 其单位为 nm; q 为大气 Angstrom 指数, 其表达式^[8]为

$$q = \begin{cases} 0.585V^{1/3}, & V_\epsilon < 6 \text{ km} \\ 1.3, & 6 \text{ km} \leq V_\epsilon < 50 \text{ km}, \\ 1.6, & V_\epsilon \geq 50 \text{ km} \end{cases} \quad (12)$$

式中: V 表示 V_ϵ 的数值大小。

当大气底层气溶胶聚集导致低能见度时, 大气能见度有效探测对飞机起降具有重要意义。假设观测路径附近不存在光源, 即只考虑背景的天空散射光, 可认为式(7)中光照度 $E(l)$ 为常数。若忽略气溶胶粒子分布的谱分布差异, 则可认为式(7)中散射相函数 $P(l)$ 为常数。此时, 大气粒子通常呈团块分布, 数浓度在水平和垂直方向上会不均匀, 则观测路径的大气柱发光主要取决于气溶胶粒子的消光效应, 若忽略探测光波段附近的大气吸收效应, 则散射系数 $\beta(l)$ 即为消光系数 $\alpha(l)$, 此时可认为散射光亮度 $J(l)$ 正比于消光系数 $\alpha(l)$, 可依据式(9)得出 $Y_L = T_L$ 。此时, 依据亮度对比阈值 ϵ , 可得出能见度的表达式^[3]为

$$V'_\epsilon = -\frac{\ln \epsilon}{\alpha'}, \quad (13)$$

式中: α' 为能见距范围内的平均消光系数, 可表示为

$$\alpha' = -\frac{1}{V'_\epsilon} \int_0^{V'_\epsilon} \alpha(l) dl, \quad (14)$$

考虑到观测路径中消光系数的不均匀性, 可依据式(13)估算斜程能见度^[15]。在式(13)中若选择固定的亮度对比阈值 ϵ (如 0.05), 则可将某段路径的平均消光系数转换为该段路径的能见距参数, 如选择近地面某高度范围内的垂直平均消光系数廓线, 可估算该高度范围内大气层的能见距, 这样就可与侧向散射型能见度仪的数据进行对比分析。

基于激光雷达的大气能见度观测的核心就是获得探测路径 l 上准确的大气消光系数廓线 $\alpha(l)$, 而在激光雷达探测理论中, 大气总消光效应主要由大气分子消光廓线 $\alpha_a(l)$ 和气溶胶粒子消光廓线 $\alpha_m(l)$ 组成, 即 $\alpha(l) = \alpha_a(l) + \alpha_m(l)$ 。大气分子消光廓线随高度的变化比较稳定, 可由标准大气模型或探空球数据获得, 而变化剧烈的 $\alpha_a(l)$ 则是米-拉曼散射激光雷达的主要观测参数。基于米-拉曼散射激光雷达原理, 依据其弹性散射通道信号 $P_L(l)$ 和氮气拉曼通道信号 $P_N(l)$, 反演得到激励波长为 λ_L 时的气溶胶消光系数 $\alpha_a(l)$ 和后向散射系数 $\beta_a(l)$, 二者的表达式^[19]为

$$\alpha_a(l) = \left\{ \frac{d}{dl} \ln \left[\frac{N_N(l)}{P_N(l) l^2} \right] - \alpha_{m,L}(l) - \alpha_{m,N}(l) \right\} / \left[1 + \left(\frac{\lambda_L}{\lambda_N} \right)^q \right], \quad (15)$$

$$\beta_a(l) = -\beta_{m,L}(l) + \frac{P_L(l)}{P_N(l)} \beta_N(l) \frac{\exp \left\{ -\int_{l_c}^l [\alpha_{a,N}(l) + \alpha_{m,N}(l)] \right\}}{\exp \left\{ -\int_{l_c}^l [\alpha_a(l) + \alpha_{m,L}(l)] \right\}}, \quad (16)$$

式中: $N_N(l)$ 为大气中氮气分子的数密度; $\beta_{m,L}(l)$ 为激励波长为 λ_L 时的大气分子后向散射系数; l_c 为参考高度, 通常选择无气溶胶的对流层顶的高度; $\alpha_{m,L}(l)$ 和 $\alpha_{m,N}(l)$ 分别为激励波长为 λ_L 和拉曼波长为 λ_N 时的大气分子消光系数; $\alpha_{a,N}(l)$ 为拉曼波长 λ_N 时的气溶胶消光系数; $\beta_N(l)$ 为氮气分子的后向散射系数, 可由标准大气模型或探空球数据获得。

3 米-拉曼散射扫描型激光雷达

依据米-拉曼散射激光雷达探测气溶胶颗粒物分布的理论, 采用收发分置的离轴结构, 研制了双波

长米-拉曼散射扫描型激光雷达,如图 1 所示,主要包括激光雷达本体和电控制柜两部分,以实现无假设同时反演大气消光系数廓线和后向散射系数廓

线,提高大气消光系数的遥感准确性。图 1 中 L1~L5 为透镜,MMF 为多模光纤,DM 为二向色镜,IF 为窄带干涉滤光片。

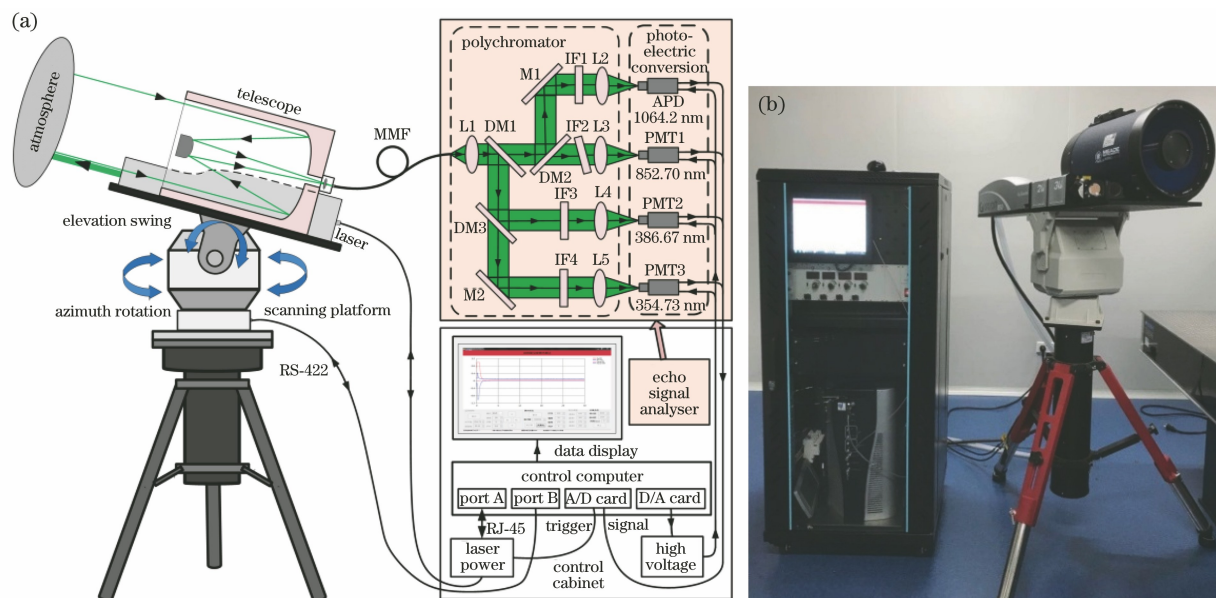


图 1 米-拉曼散射扫描激光雷达。(a)原理图;(b)实物图

Fig. 1 Mie-Raman scanning lidar. (a) Schematic diagram; (b) physical diagram

激光雷达本体包括扫描机构、激光器、望远镜和支撑脚架。电控制柜主要集成了工控机、激光电源、回波信号分析系统(包含光谱分光和光电探测两部分)和功率驱动系统等。激光雷达本体和电控制柜之间通过线缆和光纤连接,工控机通过网口(port A)与激光电源连接,控制并获得激光器的状态,同时工控机通过通用串行总线(USB)口转 RS-422(port B)与二维扫描机构连接,实现二维转动(水平回转和俯仰摆动)并获得当前姿态信息。激光电源输出激光脉冲发出的同步信号输出至工控机模数转换(A/D)采集卡的触发信号输入端处,同时光电探测器[光电倍增管(PMT)和雪崩光电二极管(APD)]的信号经信号调理(放大和滤波)后接入控制计算机 A/D 采集卡的输入信号端处,实现触发模式的 4 路激光雷达回波信号采集,计算机的数模转换(D/A)控制卡驱动高压模块输出光电探测器所需要的高压驱动信号。米-拉曼扫描激光雷达主要参数如表 1 所示,其中 FWHM 为半峰全宽。

考虑到可见光波段的眼安全阈值较低和机场可见光遥感波长的限制,该扫描型激光雷达选择可见光波段附近的 1064.20 nm 和 354.73 nm 波长作为系统激励波长,其额定单脉冲能量分别为 290 mJ 和 300 mJ,此时不能保证在有限探测路径(如长度为 2 km)以外的人眼的安全性^[20-21],进而需要设计专门的脉冲能量控

制模块,以安全探测大气能见度。激光雷达系统采用双波长工作模式,虽然不如单波长系统灵活,也增加了系统的复杂性和成本,但是可通过反演气溶胶粒子谱分布的方式获得更准确的大气能见度数据。

激光雷达中 Nd:YAG 固体激光器发出 1064.20 nm(基频)和 354.73 nm(三倍频)的混合光经准直扩束后进入大气,大气中的气溶胶粒子与气体分子产生散射和吸收等相互作用。大气回波信号由直径为 254 mm 的卡塞格林式望远镜接收并耦合进入 MMF,经透镜准直扩束后入射到以二向色镜和窄带滤光片为核心的光谱分光系统中。经过高效光谱分光后,将回波信号分为 4 路独立的光信号通道,其中 354.73 nm 的弹性散射光信号通道、386.67 nm 的氮气拉曼散射光信号通道和 852.70 nm 的拉曼散射光信号通道由 PMT 实现光电探测,1064.20 nm 的弹性散射光信号通道由 APD 进行光电转换,探测电信号由数据采集卡输入计算机进行能见度数据反演与分析。扫描模块的主要功能是控制激光雷达收发装置实现水平和俯仰二维扫描,操作人员通过上位计算机的集成控制软件连接各个模块进行多模块协同控制,设置好扫描模式、激光脉冲和采样间隔等参数,启动“开始采集”指令后,依据激光脉冲协调数据采集、存储和处理,进而实现斜程能见度激光雷达系统在观测过程中的多模块协调工作。

表 1 米-拉曼扫描激光雷达主要参数

Table 1 Main parameters of Mie-Raman scanning lidar

Device	Parameter	Description
Transmitter	Exciting wavelength /nm	355 or 1064
	Nominal pulse energy /mJ	300@354.73 nm (adjustable), 290@1064.20 nm (adjustable)
	Pulse repetition frequency /Hz	10
	Pulse duration /ns	8
Receiver	Telescope type	Cassegrain
	Diameter of telescope /mm	254
	Field of view /mrad	0.5
	Optic fiber diameter /mm	0.8
Polychrotor	Central wavelength (CW) of IF _x (x=1, 2, 3, 4) /nm	1064, 20, 852.70, 386.67, 354.73
	FWHM of IF _x /nm	0.3, 1.0, 1.0, 0.3
	Transmittance of IF _x for CW	60% for each
	Blocking level of IF _x	OD6 for each
	Cut-on wavelength of DM _y (y=1, 2, 3) /nm	735, 950, 376
	Transmittance for transmission band	95% for each
Signal detection and acquisition module	Reflectance for reflection band	99% for each
	Type of PMT _y	R5108, R7056, R7056
	Quantum efficiency of PMT _y /%	3, 22, 23
	Gain of PMT _y	3×10^5 , 5×10^6 , 5×10^6
	Type of APD	S11519-30
	Quantum efficiency /%	40
	Sampling rate / (MSa · s ⁻¹)	40
Sampling resolution /bit	16	
Scanning module	Azimuth angle range / (°)	0-360
	Elevation angle range / (°)	-45-45
	Scanning resolution / (°)	0.01
	Scanning velocity / [(°) · s ⁻¹]	0.01-15.00 (adjustable)

依据系统工作要求,研制的集成控制软件主要包括扫描控制模块、激光控制模块、高压控制模块和数据采集与处理模块,设计的集成控制软件的主界面如图 2 所示,其主要包括 6 个区。在激光雷达上电后,打开工控机的系统集成控制软件,等待软件初始化结束后自动显示主界面。

如图 2 所示:①区是信号显示区,即实时直观显示当前采集廓线的 4 路信号累加结果,可用于观测系统的运行状况;②区是扫描控制区,用来手动控制扫描机构的回转运动,实现系统的二维扫描功能;③区是激光控制区,用来调整激光器参数和手动控制激光器状态,尤其是实现了激光脉冲能量调整功能,便于后期开发依据气象条件自动调整激光能量,进而实现规定距离外的人眼安全遥感;④区是高压控制区,可直接设置相应的 4 路通道光电探测模块的高压;⑤区是数据采集区,可设置廓线或扫描的采集参数,并进行合理性判断;⑥区是系统运行状态显示

区,分别显示运动姿态、激光状态、高压设置和采集状态等实时信息。

集成控制软件是保障扫描激光雷达系统多模块协同工作的关键,其中扫描控制模块、激光控制模块、高压控制模块都具备手动操控功能,具有一定的独立性。然而,数据采集与处理模块综合性很高,需要在实现扫描控制模块、激光控制模块和数据采集模块的高效协同的同时,对数据进行处理与显示,以满足激光同步脉冲触发下的高空间分辨率(40 MSa/s 对应 3.75 m)、高采样分辨率(16 bit)的 4 通道数据采集与 3 模块状态协同的要求。

传统的软件控制策略在实现复杂逻辑时会显著提高软件复杂度,降低逻辑可读性,而采用专门的状态机思想来统一维护管控系统中各种状态的运行是一种有效且可靠的方案^[22]。有限状态机是一种规范的状态管理模式,在硬件和软件设计中广泛应用^[23],其通过描述对象在生命周期内所经历的状态

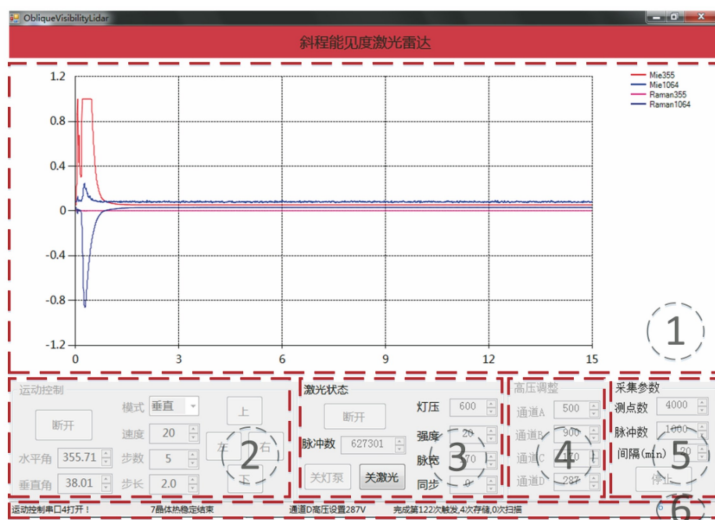


图 2 集成控制软件的主界面

Fig. 2 Main interface of integrated software

序列和如何响应来自外界的各种事件来实现该状态机系统逻辑的正常运行。基于有限状态机原理，设

计系统状态转换的控制策略如图 3 所示，从软件初始化结束进入主界面开始，主要包括扫描控制转换

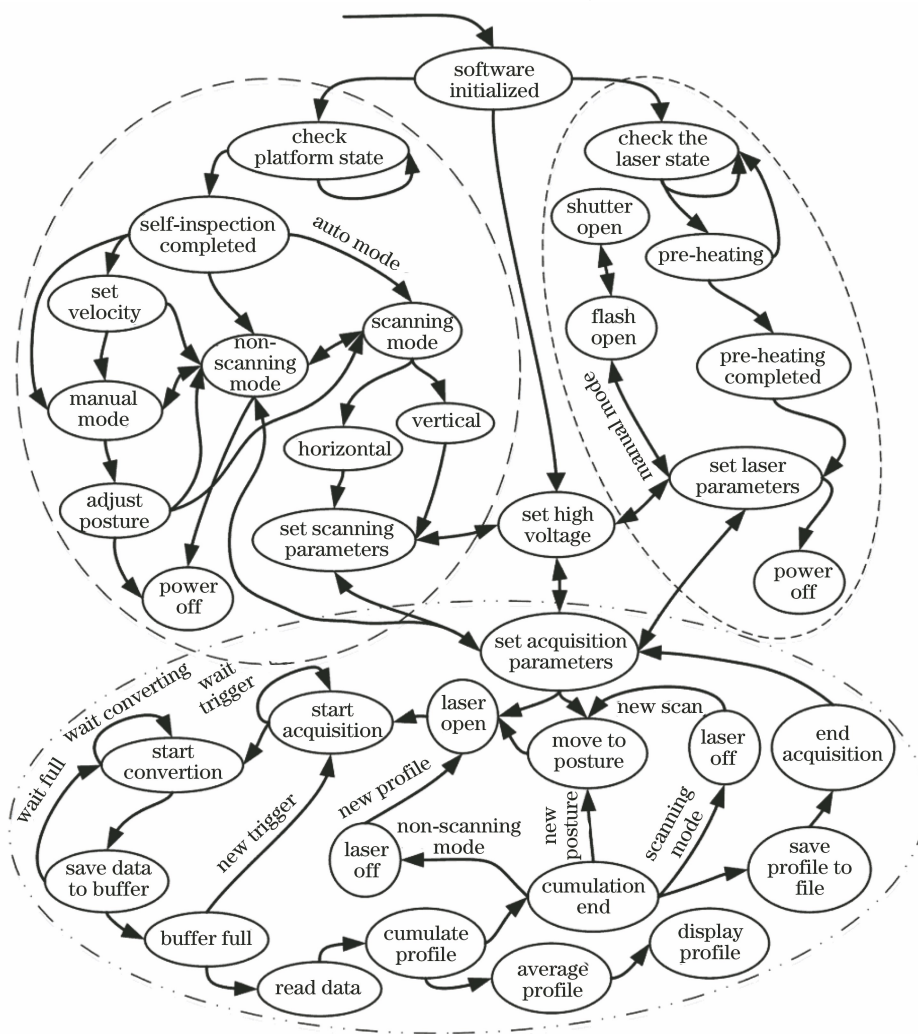


图 3 基于有限状态机的扫描激光雷达的状态转换图

Fig. 3 State transition of scanning lidar based on finite state machine

图(左上角)、激光控制转换图(右上角)、采集处理转换图(下部)和简单的高压设置(中间)。

在集成控制软件的主界面中操作链接扫描控制模块,并完成自检归零后,就可进行扫描控制。扫描控制模式有手动和自动两种:在手动模式下可通过按钮进行扫描机构的姿态操作,会实时显示方位角和俯仰角的姿态信息;在自动模式下,选择非扫描模式或定点模式,可实现常规的激光雷达观测,而选择水平扫描或俯仰扫描模式,预设云台起始方位角、俯仰角、扫描步长和扫描步数等参数后,可与数据采集模块协同完成扫描模式的激光雷达观测。同样,在

集成控制软件的主界面中操作链接激光控制模块,通过传输控制协议/网际协议(TCP/IP)与激光器进行通信并对其进行控制,在激光系统自检预热完毕后,可手动设置灯压、强度和脉冲宽度等相关参数,并可读取激光器中灯泵浦的累计脉冲数。在自动模式下,激光器的状态完全由软件控制。

数据采集与处理模块是集成控制软件的核心,通过设置采样点数(探测距离)、累积脉冲数(时间域平均),以及廓线间隔(非扫描模式)或扫描间隔(扫描模式),实现激光雷达的程序控制,其控制时序图如图 4 所示。

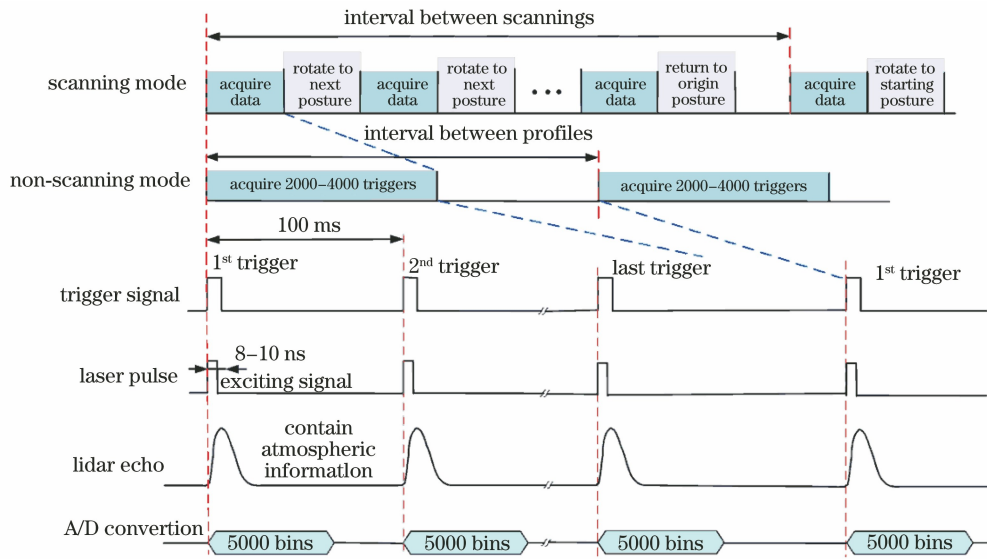


图 4 扫描激光雷达的时序图
Fig. 4 Time sequence diagram of scanning lidar

为实现数据采集与激光脉冲的协同匹配,采用多线程并发机制和环形双数据缓冲区结构。主线程主要实现人机交互的主任务,同时单独并发数据采集线程,实现数据采集。在数据读取后,由数据处理线程实现数据的累加和平均运算,并将结果传送至主线程中进行实时显示。环形双数据缓冲区结构可实现数据的高效采集,其工作原理如图 5 所示。在系统采集工作开始后,先由缓冲区 A 接收采集到的数据,如图 5(a)所示。在采集够预先设置的脉冲数后,将后续数据存储于缓冲区 B 中,同时利用数据采集线程读取缓冲区 A 中的数据,如图 5(b)所示。在缓冲区 B 存储满之前,清空缓冲区 A,即要求读取数据时间小于数据采集时间,如图 5(c)所示。将后续数据存储于缓冲区 A 中,同时利用数据采集线程读取缓冲区 B 中的数据,如图 5(d)所示。在缓冲区 A 存储满之前,清空缓冲区 B,如图 5(a)所示。如此循环,实现激光雷达的无脉冲丢失数据采集。

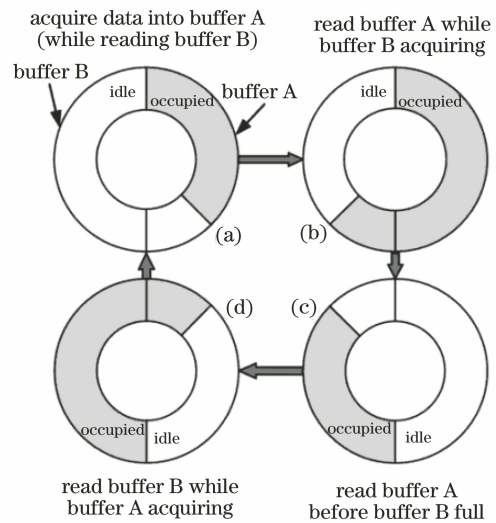


图 5 环形双数据缓冲区原理。(a)状态一;(b)状态二;(c)状态三;(d)状态四
Fig. 5 Principle of ring-shaped double data-buffer. (a) State 1; (b) state 2; (c) state 3; (d) state 4

4 观测实验和分析

基于硬件和软件结合的系统集成技术,研制了一台米-拉曼散射扫描型激光雷达,如图 1 所示。在不同天气状况下,开展大气斜程能见度实际观测实验,实验地点位于西安理工大学金花校区学科二号楼南侧(108.9983°E,34.2615°N),探测方向朝西。通过激光能量控制功能调整输出脉冲能量为表 1 中额定脉冲能量的 70%,并与侧向散射型点式能见度仪(通常认为其可测得水平能见度)进行对比分析,以验证所研制的激光雷达探测大气斜程能见度的有

效性和稳定性。

4.1 俯仰扫描数据分析

将该系统用于大气斜程能见度观测实验中,系统能够稳定运行,可有效获取测量数据。依据米-拉曼散射反演气溶胶消光系数算法,即式(15),图 6 给出了 2020 年 11 月 19 日 16:00—17:00(天气是多云转阴)某次俯仰扫描数据的大气消光系数的距离高度指示器(RHI)图,该次扫描以 2°俯仰角间隔从 18°开始,增加至 42°结束,共获得 13 组数据。从图 6 中可以看出,随着高度的增加,大气消光系数呈现逐渐降低的趋势,在 4 km 左右存在两层薄云。

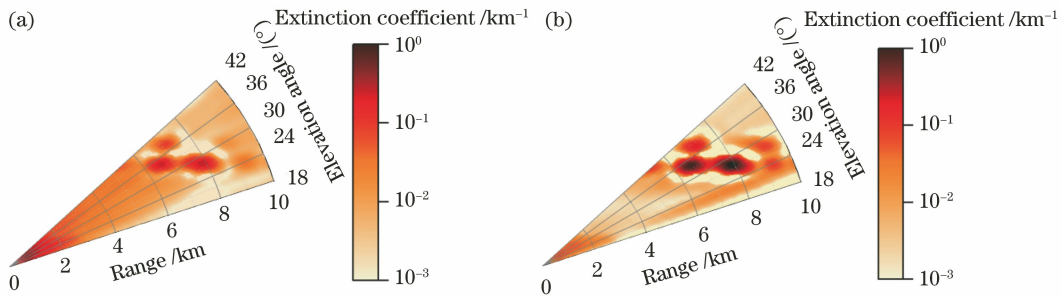


图 6 不同激发波长下大气消光系数的 RHI 图。(a) 355 nm;(b) 1064 nm

Fig. 6 RHI diagrams of atmospheric extinction coefficient at different exciting wavelengths. (a) 355 nm; (b) 1064 nm

图 7 给出了图 6 扫描中不同俯仰角 φ 下的大气消光系数廓线,右坐标轴是探测距离 R ,左坐标轴是依赖于俯仰角 φ 的探测高度 H ,其表达式为 $H = R \cdot \sin \varphi$ 。由图 7(a)可以看出,当激光雷达有效探测距离 R 优于 11 km 时,其对应的高度 H 约为 5 km,由于大气底层气溶胶分布对大气斜程能见度的影响很大,因此后续的观测和分析主要聚焦于高度在 5 km 以下的大气层,尤其是高度在 1 km 范围内的底层气溶胶聚集区(大气边界层内)。从图 7 中

可以看出,1 km 高度以下存在较厚的气溶胶颗粒物的聚集层,而高度 3.6 km 和 4.4 km 附近各存在一层薄云。对比 3.5 km 云层以下激励波长 355 nm 和 1064 nm 的消光系数廓线可以发现,355 nm 的消光系数曲线变化平缓,而 1064 nm 的消光系数廓线在 1.0~3.5 km 之间变化较大。主要表现为:在云层下方的 0.6 km 范围内消光系数较大,表明在云层下方存在一定浓度的大尺度颗粒物;高度为 3.5 km 的云层中粒子对 1064 nm 的消光作用大于 355 nm 的消光作用,说明云中存在较大尺度的云粒子,符合云粒子分布的基本特征。

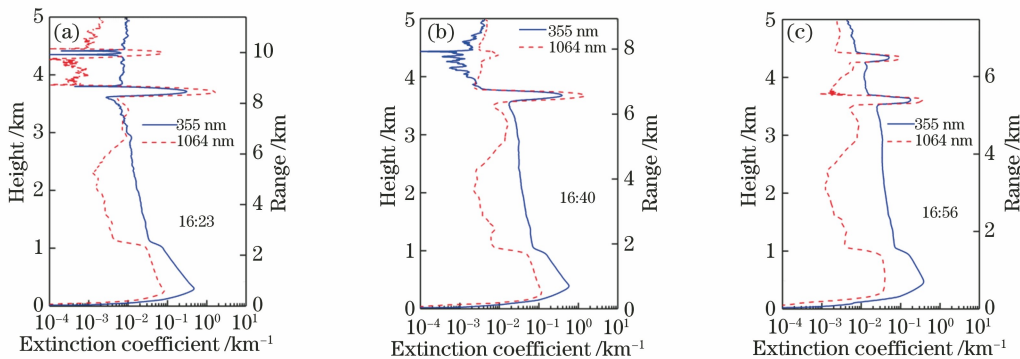


图 7 不同俯仰角的消光系数廓线。(a) 26°;(b) 34°;(c) 42°

Fig. 7 Extinction coefficient profiles with different elevation angles. (a) 26°; (b) 34°; (c) 42°

4.2 大气能见度观测和分析

相比高空的大气消光特征,飞机驾驶员在起飞和降落过程中,更关注在大气边界层内的消光系数特性(或大气斜程能见度),如图 7 中 1 km 以下的大气特性所示,此时通常满足式(13)的假设条件,其中 CST 为中国标准时间。依据激光雷达回波信号反演的大气消光系数廓线,以某高度为起点(受限于激光雷达的盲区和重叠因子),评价多段高度范围内的平均消光系数,依据式(13)计算大气斜程能见度参数,并与地面侧向散射型点式能见度仪 (VM) 的实测水平能见度数据进行比较,如图 8 所示,以验证所研制的激光雷达系统的有效性。图 8(a) 给出了图 7 中扫描数据的对比分析。分别以 1 min 和 4 min(匹配激光雷达数据的时间分辨率)的测量点进行标识,激光雷达数据则以 240 m 高度(以扫描的俯仰角度折算到高度 H)为起点,从左向右的俯仰角逐渐增加,观测时间为 2020 年 11 月 19 日,激

励波长为 355 nm。可以看出,大气水平并不均匀,随着评价高度范围的增大,该不均匀性的影响逐渐降低,且在低俯仰角(如时间 16:12 的数据)处更接近 VM 测得的数值。图 8(b) 为采用低俯仰角(18°)在非扫描模式下获取的观测数据,并以 220 m 高度为起点,分析了 5 段不同高度范围内的平均消光系数计算得到的斜程能见度数值,观测时间为 2021 年 7 月 8 日,激励波长为 355 nm。可以发现,该 5 组数据随时间的变化趋势与 VM 测得的数据一致,且 220~620 m 评价高度范围内对应的数据一致性较高。然而,仍然存在随时间变化不一致的情形,主要是大气水平的不均匀性(激光雷达评价大气层与 VM 评价大气层存在水平距离差)导致的。另外,随着评价高度范围的增大,斜程能见度参数逐渐变大,由 10 km 左右增加至 30 km 左右,反映了研制实现斜程能见度探测的扫描型激光雷达的必要性。

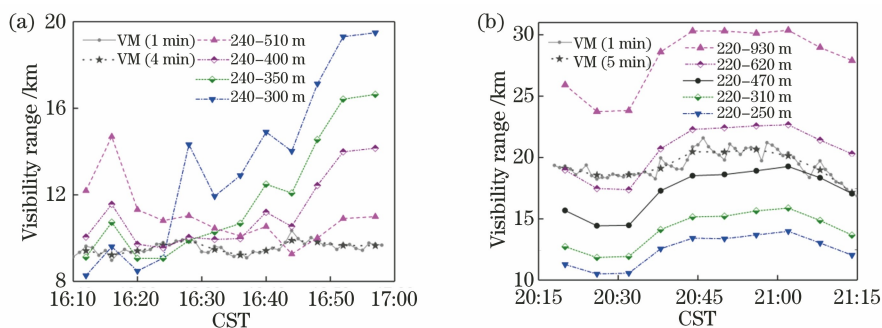


图 8 不同模式下观测实验对比分析。(a)扫描模式;(b)非扫描模式

Fig. 8 Comparison of observation experiments with different modes. (a) Scanning mode; (b) non-scanning mode

图 8(b)中斜程能见度参数一致性优于图 8(a),原因为:1)工作模式不同,即扫描模式与非扫描模式差异;2)水平大气的非均匀性。因此,2021 年 7 月 15 日采用非扫描模式进行实验,分析结果如图 9 所示,俯仰角度为 18°。图 9(a)、(b)分别为 355 nm 和

1064 nm 波长下的分析数据。可以看出:图 9(a)中 220~1000 m 高度范围内的大气能见距与 VM 数据匹配较好,但是在 22:00 之后数据仍然存在差异;图 9(b)中 80~400 m 高度范围内的大气能见距与 VM 数据匹配较好,表明大气中气溶胶颗粒物的大小也

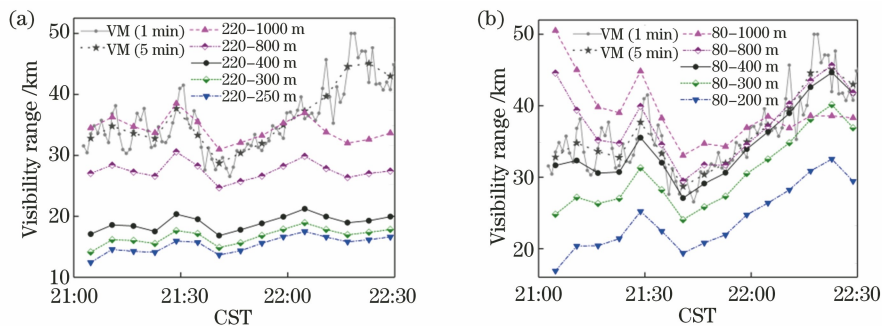


图 9 不同激发波长下观测实验对比分析。(a) 355 nm;(b) 1064 nm

Fig. 9 Comparison of observation experiments with different exciting wavelengths. (a) 355 nm; (b) 1064 nm

会对能见距参数产生影响。另外,1064 nm 波长的评价距离更低也是数据吻合性较好的原因。

为分析所研制的激光雷达的长时间观测能力,于 2021 年 10 月 12 日开展了 24 小时连续观测实验,如图 10 所示。天气情况为阴转多云,实验采用定点模式,俯仰角为 12° ,方位朝向西方,数据累积时间为 3 min,探测廓线时间间隔为 20 min。从图 10 中可以看出:在地面附近的斜程能见度与 VM 数

据一致性较好;由于观测日在雨天之后,气温下降较大,故雾气是夜间能见度降低的主要原因,而白天随着气温的升高,能见度有所提高。对比两波长反演数据可以发现,14:00—19:00 时间段内 100 m 高度上气溶胶分布差异明显,主要原因在于人类活动导致的大颗粒物抬升尚未到达该高度,进而 1064 nm 波段斜程能见度明显优于 355 nm 波段。

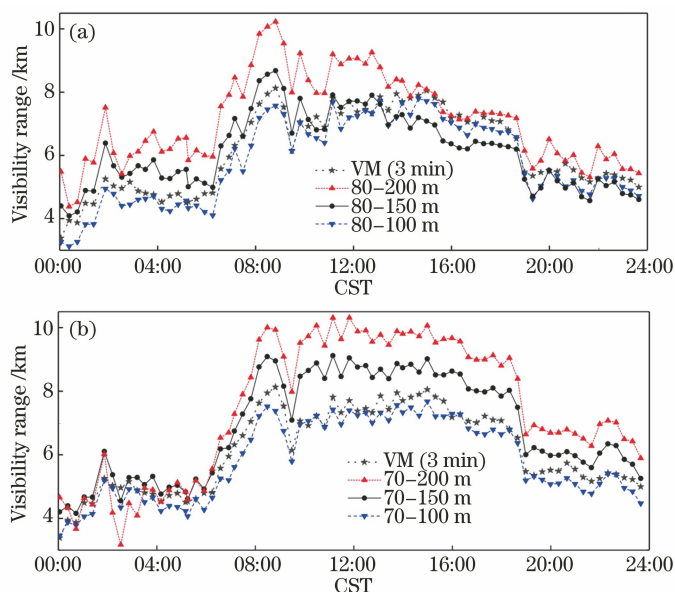


图 10 不同激发波长下的 24 小时观测实验结果。(a) 355 nm;(b) 1064 nm

Fig. 10 Observation experiment results for 24 hours at different exciting wavelengths. (a) 355 nm; (b) 1064 nm

5 结 论

基于大气的透过率理论,比较分析了水平能见度和斜程能见度的差异。在观测路径附近不存在辐射源,且消光系数正比于散射系数的假设下,分析了以路径消光系数的平均值反演能见度方案的有效性。基于大气气溶胶粒子的米散射和分子的振动拉曼散射理论,研制了一台 4 通道米-拉曼散射二维扫描型激光雷达,利用有限状态机理论等技术,设计并开发了多模块协同的集成控制软件,以实现双波长的大气消光系数廓线反演,进而实现对斜程能见度的精细探测。初步观测实验表明,当天气为阴转多云,地面水平能见度为 9 km,俯仰角为 26° 时,4 min 累积时间内该系统的有效探测距离优于 11 km。结合侧向散射型能见度仪,开展了测量结果的对比分析,近地面分层数据分析结果取得了较好的一致性,验证了研制的激光雷达遥感探测斜程能见度的有效性,可为飞机的起飞和降落提供准确的大气信息。

参 考 文 献

- [1] 饶瑞中. 大气中的视觉和大气能见度[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2486-2492.
Rao R Z. Vision through atmosphere and atmospheric visibility[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2486-2492.
- [2] 肖韶荣, 刘博涵, 石刘峰, 等. 光电探测器尺度效应对能见度测量不确定度的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1204001.
Xiao S R, Liu B H, Shi L F, et al. Influence of scale effect of photodetector on visibility measurement uncertainty[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1204001.
- [3] 马愈昭, 刘嘉琪, 王强强, 等. 基于 Fernald-PSO 法反演气溶胶激光雷达比及其对斜程能见度的影响[J]. 光子学报, 2019, 48(3): 0301001.
Ma Y Z, Liu J Q, Wang Q Q, et al. Inversion of aerosol lidar ratio and its effect on slant visibility based on Fernald-PSO method[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(3): 0301001.
- [4] 李浩, 孙学金, 单陈华, 等. 关于气象能见度理论与观测的讨论[J]. 解放军理工大学学报(自然科学

- 版), 2013, 14(3): 297-302.
- Li H, Sun X J, Shan C H, et al. Basis theory and observation of meteorological visibility[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 14(3): 297-302.
- [5] 谢晨波, 韩永, 李超, 等. 车载式激光雷达测量大气水平能见度[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(7): 971-975.
- Xie C B, Han Y, Li C, et al. Mobile lidar for visibility measurement [J]. High Power Laser & Particle Beams, 2005, 17(7): 971-975.
- [6] 庄子波, 台宏达, 蒋立辉. 一种基线长度改变的能见度测量和评价方法[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0201001.
- Zhuang Z B, Tai H D, Jiang L H. Changing baseline lengths method of visibility measurement and evaluation[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0201001.
- [7] 李浩, 孙学金. 前向散射能见度仪测量误差的理论分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 1094-1098.
- Li H, Sun X J. Theoretical analysis on measurement error of forward scattering visibility meter [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(6): 1094-1098.
- [8] 岳斌, 董晶晶, 孙东松, 等. 便携式激光雷达能见度仪的研制[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S3): 129-132.
- Yue B, Dong J J, Sun D S, et al. Development of portable visibility lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S3): 129-132.
- [9] Pantazis A, Papayannis A, Georgousis G. Lidar algorithms for atmospheric slant range visibility, meteorological conditions detection, and atmospheric layering measurements[J]. Applied Optics, 2017, 56(23): 6440-6449.
- [10] 李秀镇, 盛立芳, 刘骞, 等. 基于SBDART辐射传输模式的晴天地面总辐射模拟误差分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(8): 13-18.
- Li X Z, Sheng L F, Liu Q, et al. Error in calculation of surface radiation based on SBDART radiative transfer model[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(8): 13-18.
- [11] 陆川, 刘文清, 王玉峰, 等. 斜程能见度计算中的天空背景辐射亮度仿真与分析[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1401001.
- Lu C, Liu W Q, Wang Y F, et al. Simulation and analysis of sky background radiance in slant visibility calculation[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1401001.
- [12] 陈敏, 孙东松, 李洪敬, 等. 激光雷达斜程能见度的一种探测方法及其分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 156-160.
- Chen M, Sun D S, Li H J, et al. Detective method and analysis of atmospheric slant visibility for lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(2): 156-160.
- [13] 唐磊, 舒志峰, 董吉辉, 等. 半导体激光雷达斜程能见度观测和反演方法[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(5): 20102205.
- Tang L, Shu Z F, Dong J H, et al. Measurement of slant visibility and its iteration method with diode-laser lidar [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(5): 20102205.
- [14] 田飞, 罗佳, 胡大平, 等. 激光雷达观测斜程能见度反演方法[J]. 激光与红外, 2012, 42(11): 1239-1243.
- Tian F, Luo J, Hu D P, et al. Inversion algorithm for slant visibility based on lidar technique [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(11): 1239-1243.
- [15] 王界, 刘文清, 张天舒, 等. 便携式双视场米散射激光雷达系统的研制[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 148-154.
- Wang J, Liu W Q, Zhang T S, et al. Development of a portable dual field-of-view Mie-scattering Lidar[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 148-154.
- [16] 宋海润, 王晓蕾, 李浩. 基于激光雷达的垂直能见度反演算法及其误差评估[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(3): 190250.
- Song H R, Wang X L, Li H. Inversion algorithm of vertical visibility based on lidar and its error evaluation [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(3): 190250.
- [17] Wang Y F, Jia L S, Li X X, et al. Measurement method for slant visibility with slant path scattered radiance correction by lidar and the SBDART model [J]. Optics Express, 2021, 29(2): 837-853.
- [18] 钱立勇, 吴德成, 刘东, 等. 高光谱成像激光雷达扫描镜的分析与设计[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0928002.
- Qian L Y, Wu D C, Liu D, et al. Analysis and design of hyperspectral imaging LiDAR scanning mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0928002.
- [19] Ansmann A, Riebesell M, Wandinger U, et al. Combined Raman elastic-backscatter LIDAR for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter, and LIDAR ratio [J]. Applied Physics B, 1992, 55(1): 18-28.
- [20] 刘厚通, 李超, 王珍珠, 等. 机载大气探测激光雷达人眼安全分析[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(3): 358-362.

- Liu H T, Li C, Wang Z Z, et al. Analysis on eye safety of airborne atmosphere detection lidar and eye safety[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(3): 358-362.
- [21] 王庆, 高春清. 人眼安全波段全固态单频激光器研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501004.
Wang Q, Gao C Q. Research progress on eye-safe all-solid-state single-frequency lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501004.
- [22] 闻霞, 任雯, 赖森财, 等. 基于有限状态机模型的全自动烫印机控制系统设计[J]. 工程设计学报, 2020, 27(6): 771-780.
Wen X, Ren W, Lai S C, et al. Design of control system of automatic hot stamping machine based on finite state machine model [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2020, 27(6): 771-780.
- [23] 黄贻望, 何克清, 彭长根. 一种面向领域知识的大数据价值服务建模方法[J]. 武汉大学学报(理学版), 2020, 66(5): 462-472.
Huang Y W, He K Q, Peng C G. A modeling of big data value service for domain knowledge[J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2020, 66(5): 462-472.