文章编号:1001-9014(2025)06-0933-09 DOI:10.11972/j.issn.1001-9014.2025.06.011

应用于森林火灾探测的高重频偏振激光雷达系统及实验

辛文辉[1], 贺亦欣[1], 姚 杰[1], 李仕春[1], 郭 延[1], 高 山[2], 狄慧鸽[1], 华灯鑫[1*]

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院,陕西 西安 710048;
2. 西安市气象局, 陕西 西安 710600)

摘要:为实现森林火灾的探测,基于火灾发生时所产生烟尘粒子的光散射、偏振效应,开发研制了一套高重频偏振激光雷达系统,由发射、接收、数据处理和扫描控制子系统组成。针对森林火灾探测的大范围、高分辨率、高时效性需求,选择大功率、高重频激光器作为探测光源,结合高角度分辨率云台实现精细的扫描探测,当激光雷达的重复频率为5 kHz时,能以1°的角度分辨在48 min内对半径为10 km的森林区域进行巡检扫描。为解决高重频探测时,回波信号的采集、累计平均难题,设计了一种新颖的、专用的"读出-累加-存储"知识产权(Intellectual Property, IP)架构,高效地实现了回波信号的采集及信噪比的提升。搭建完成的高重频偏振激光雷达进行了近、远场模拟实验,探测的高值点与火点位置一致,将该激光雷达部署于延安市,成功地探测到了5.4 km和8.1 km处模拟火灾的发生,验证了系统的有效性。

关 键 词:森林火灾; 激光雷达; 偏振; 退偏比; 高重频; 扫描
中图分类号:TN956 **文献标识码**: A

High repetition rate polarization Lidar system and experiment for forest fire detection

XIN Wen-Hui[1], HE Yi-Xin[1], YAO Jie[1], LI Shi-Chun[1], GUO Yan[1], GAO Shan[2], DI Hui-Ge[1], HUA Deng-Xin[1*]

(1. School of Mechanical and Precision Instruments Engineering, Xi′an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. Xi′an Meteorological Bureau, Xi'an 710600, China)

Abstract: In order to monitor forest fires, a high-repetition-rate polarization Lidar system was developed based on the light scattering and polarization characteristics of smoke particles generated during fires. The system consists of subsystems for laser emission, optical reception, echo signal acquisition and processing, and scanning control. To meet the demands for large-scale, high-resolution, and rapid forest fire detection, a high-power, high-repetition-rate laser was selected as the probing source, coupled with a high-resolution gimbal for precise scanning. With a Lidar repetition rate of 5 kHz, the system can perform patrol scanning a forest area with a 10 km radius in 48 minutes at an angular resolution of 1°. To address the challenges of echo signal acquisition and cumulative averaging during high-repetition-rate detection, a novel "readout-accumulation-storage" IP (Intellectual Property) architecture was designed, enabling efficient echo signal processing and improving the signal-to-noise ratio. The completed high-repetition-rate polarization Lidar underwent near-field and far-field simulation experiments, with detected signal peaks corresponding to fire locations. When deployed in Yan'an City, the Lidar successfully detected simulated fires at distances of 5.4 km and 8.1 km, validating the system's effective detection capability.

Key words: forest fire, Lidar, polarization, depolarization ratio, high repetition frequency, scanning

收稿日期:2025-02-26,**修回日期**:2025-05-06 **Received date**:2025-02-26,**Revised date**:2025-05-06
基金项目:国家自然科学基金项目(42275151)、陕西省重点研发计划项目(2021ZDLSF06-07)
Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China Project (42275151), the Key R&D Plan of Shaanxi Province (2021ZDLSF06-07)
作者简介(Biography):辛文辉(1973—),男,陕西人,博士,副教授,主要研究领域为激光雷达大气探测. E-mail: xinwenhui@xaut.edu.cn
[*] **通讯作者**(Corresponding author): E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn

引言

森林可以净化环境、涵养水源、维持生态系统平衡，是人类的宝贵财富。近年来，随着全球气候异常的加剧，森林火灾有频发的趋势，及早地发现火灾并预警，对保护森林资源具有重要意义[1]。目前，森林火灾监测方法有人工瞭望巡检、近地面视频监测、卫星监测和航空巡检等，各自都有一定的优势和局限性[2-5]。其中，卫星监测可使用极轨卫星和地球静止卫星，极轨卫星绕地球南北极运行，如中国的风云三号、高分六号等，其扫描覆盖全球范围，最小分辨率分别为250 m、2 m，但重访周期却分别为12 h、2天[6, 7]；地球静止卫星（如风云四号）在地球上空固定，其地球圆盘成像时间约为15 min，但分辨率却在0.5~4 km[8]，并且由于云等天气因素的干扰，实际并不是每次都能获得有效的图像，这导致了火灾发现、扑救的延误[9]。航空巡检中，传统的火灾巡检飞机的巡查视野宽广、速度快，但面临着恶劣天气下难以起飞，航线、飞行时间受限等问题，无法完成24 h的连续监测；无人机具有机动、快速等优点，配备了高清摄像头、红外热成像等设备，在森林防火领域有一定的优势，但需要综合考虑续航、载重及环境适应性等因素[10]。

激光雷达是一种光学频段的雷达，通过其所发射的激光光束与大气中的大气分子、气溶胶粒子的相互作用来进行大气温湿度、风场、气溶胶、大气组分等的探测，具有探测距离远、分辨率高等优点[11, 12]。森林火灾发生时，树木及枝叶燃烧生成的烟尘粒子会产生强烈的米散射和退偏效应，根据这些特征可对森林火灾的发生进行有效甄别。因此，激光雷达是森林火灾有力的监测工具[10-13]。研究者Utkin等人首先报道了使用波长为532 nm、能量为20 mJ、重复频率为15 Hz的Nd:YAG激光器的森林火灾烟雾探测系统，但探测距离只有2.5 km[13]；法国研究者Cancellieri等人基于所建立的火灾烟羽扩散物理模型，用波长为355 nm，单脉冲能量16 mJ，重复频率为20 Hz的激光雷达对火灾所产生的烟尘进行了扫描探测，实验结果与仿真模型计算值具有较好的一致性[14]，但由于其所使用的激光雷达的重复频率过低，扫描大区域范围需时较长，导致探测的时效性差；以色列的研究者Birgit用波长为532 nm、607 nm的双频激光雷达对火灾所产生的气溶胶的漂移情况进行了探测[15]；研究者Zahary等人也基于532 nm、1 064 nm双频激光雷达对森林火灾发生时产生的烟尘气溶胶进行了探测，实现了4.2~4.5 km森林火灾的有效探测[16]。

以上研究中，由于所使用的激光器的激光脉冲重复频率较低，大多为10 Hz级，会使每扫描一个角度需要数分钟的累计平均时间，这导致了有限时间内的扫描区域有限，或者系统探测的时效性变差。2023年，中国科学技术大学徐文静、冼锦洪等人设计了一款波长为1 064 nm、单脉冲能量>100 μJ、重复频率为1~10 kHz，以光子计数型雪崩二极管（Avalanche Photodiodes，APD）为探测器件的偏振激光雷达系统，以实现10 km的火灾探测[4, 17]。然而，光子计数探测器虽然可提升探测距离，但容易导致近场信号饱和，使得近距离火灾反倒不容易被发现。近年来，西安理工大学华灯鑫教授团队基于其在气溶胶及大气参量探测领域的积累，在陕西省重点研发计划——“基于扫描激光雷达和卫星遥感的森林火灾立体监测预警技术与应用”的支持下，也进行了基于激光雷达的森林火灾的探测技术研究[18-20]，搭建了一台可示范应用的扫描偏振激光雷达工程样机，并进行了实际探测。本文给出了该激光雷达系统的工作原理和主要技术参数，选用高重频激光器以提高探测时效性和分辨率，并对在高重复频率探测下如何提升回波信号的信噪比进行了分析，设计了专用的数据采集、累计平均模块，并对该激光雷达系统的火灾探测性能进行了实际验证。

1 激光雷达森林火灾烟尘探测原理

激光光束在大气中传输时，激光光束会与大气分子、气溶胶粒子分别发生瑞利散射、米散射现象，产生消光效应，其被望远镜接收的后向散射信号$P(z)$可以用激光雷达方程来描述：

$$P(z)=\frac{P_0\cdot k}{z^2}\left[\beta_a(z)+\beta_m(z)\right]\exp\left\{-2\int_0^z\left[\alpha_a(z')+\alpha_m(z')\right]\mathrm{d}z'\right\}\quad,\quad(1)$$

式中，z为探测距离，P_0表示激光脉冲的出射功率，k作为系统常数，$\beta(z)$为后向散射系数，$\alpha(z)$为消光系数。下标a表示气溶胶粒子，m表示大气分子。

设定S_a为气溶胶粒子消光系数与后向散射系数之比，S_m为大气分子消光系数与后向散射系数之比，对式（1）两边同乘z^2得到距离平方矫正信号（Range Squared Correction Signal，RSCS），再经过积分、取对数、求导等一系列Fernald反演算法[21, 22]，得到高度z处气溶胶粒子的消光系数为：

$$\alpha_a(z)=-\frac{S_a}{S_m}\alpha_m(z)+\frac{P(z)z^2\exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m}-1\right)\int_z^{z_0}\alpha_m(z)\mathrm{d}z\right]}{\frac{P(z)z_0^2}{\alpha_a(z_0)+\frac{S_a}{S_m}\alpha_m(z_0)}+2\int_z^{z_0}P(z)z^2\exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m}-1\right)\int_z^{z_0}\alpha_m(z')\mathrm{d}z'\right]\mathrm{d}z},\quad(2)$$

式中,$\alpha_a(z_0)$、$\alpha_m(z_0)$分别为气溶胶粒子、大气分子消光系数的边界值,可以通过标准大气模型来确定。

此外,大气中的气溶胶粒子也会因为粒子的形态不同而发生偏振效应。当发射的激光光束为线偏振光,而气溶胶粒子为非球形粒子时,其后向散射光中就会包括平行和垂直于原线偏振光的两个偏振分量,分别用P光和S光表示,其回波功率可表示为:

$$P_{P/S}(z)=\frac{P_0\cdot k_{P/S}}{z^2}\beta_{P/S}(z)\exp\{-2\int_0^z\alpha_{P/S}(z')\mathrm{d}z'\}.\quad(3)$$

用退偏比——S光与P光的比值来描述偏振态的改变,公式表示为[23]:

$$\delta(z)=\frac{P_S(z)/k_S}{P_P(z)/k_P}=\frac{\beta_S(z)}{\beta_P(z)}\exp\{\int_0^z2[\alpha_P(z')-\alpha_S(z')]\mathrm{d}z'\}.\quad(4)$$

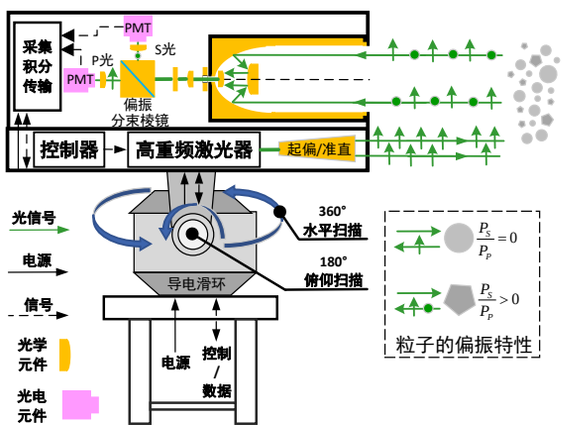
根据公式(2)可以求得探测区域的消光系数,该值反映了烟尘、云雾等气溶胶粒子的浓度变化,但消光系数无法区分粒子形态,需要根据公式(4)所得的退偏比进一步进行判别。研究表明:海洋及大陆气溶胶粒子通常为球形,退偏比接近于零,沙尘的退偏比约为0.2~0.3。森林火灾发生时,由于生物质燃烧过程中产生的烟尘粒子混合了水汽,其退偏比一般在0.1左右[4],因此基于粒子偏振效应的偏振激光雷达可以实现森林火灾的探测。

2　扫描偏振激光雷达系统

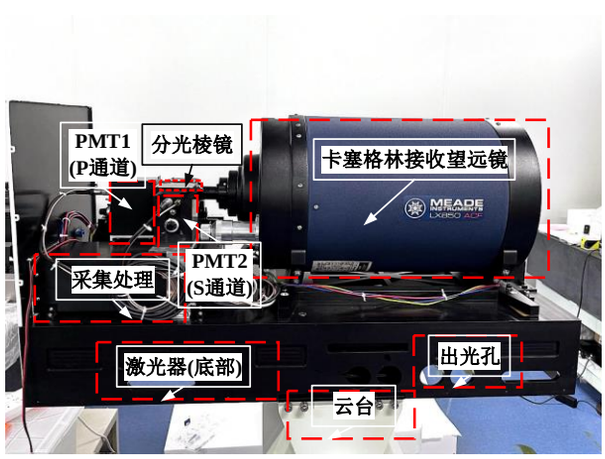
2.1　系统参数

图1所示是扫描偏振激光雷达系统结构图和实物图,由光学发射、接收、扫描、数据采集累计模块组成。工作时,激光器出射窄脉冲激光,经起偏器、扩束镜后进入大气,与大气分子、气溶胶粒子相互作用。其后向散射光被望远镜接收,通过孔径光阑、准直透镜后,被偏振分束棱镜分成P光和S光,最后经光电转换模块——PMT(Photomultiplier Tube)转化为电信号,经采集、累计平均和反演后,得到探测区域的消光系数及退偏比廓线,根据消光系数与退偏比就可以对火灾的发生、位置做出判断。

偏振激光雷达在进行森林火灾探测时,需要解



(a)



(b)

图1　扫描偏振激光雷达系统:(a)结构图;(b) 实物图

Fig. 1　Scanning polarization LiDAR system: (a) structural diagram; (b) physical photograph

决大区域覆盖、高分辨率和高时效性三重挑战。大区域覆盖要求激光雷达可对半径为10 km左右的区域进行360°的旋转扫描,高分辨率要求激光雷达可对10 m^{2}左右的烟尘进行探测,高时效性要求探测系统能够在1 h内完成对目标区域的全面扫描,以及时发现火灾,从而避免其迅速蔓延。然而,实际应用中,这三个问题往往交织在一起,相互制约。例如:当探测半径为10 km时,1°的扫描步距角对应的最远处的距离分辨是174 m;此外,由于大气中背景

噪声的干扰，通常需要对采集到的数据链表进行数千次甚至上万次的对应点累计平均，才能获得信噪比足够高的廓线数据。当激光雷达的重复频率为100 Hz时，以1°的扫描步距角、20 k的数据链表累计平均，完成360°的扫描探测需要的时间是2 h，这显然不能满足时效性的要求。

为解决以上问题，本研究选用高脉冲能量、高重频激光器作为探测光源。高脉冲能量可实现大区域覆盖，而高重频激光器可以减小累计平均所需要的时间，当激光器的重复频率为5 kHz时，累计40 k次仅需要8 s的时间。为实现高分辨率探测，选择角度分辨为0.1°的可精细扫描的云台，并采用50 MHz的采样速率对回波信号进行采集，这样可以使得最小扫描面积为17.4 m×3 m。然而，以0.1°的角分辨率进行扫描时，会使得扫描时间过长，为此，采用低分辨率巡检与精细探测相结合的扫描策略：系统先以1°的角分辨率对整个区域进行巡检探测，一旦发现异常区域，立即启动精细扫描，以0.1°的高分辨率对该区域进行详细探测，以确认火情，可将扫描时间控制在1 h内。

表1所示是该雷达系统的关键参数。其中，激光器选择南京先进激光技术研究所的高重频窄脉冲全固态激光器—AOML-500，该激光器将激光头、驱动模块、电源控制及散热模块进行了集成，整个结构小巧紧凑。该激光器的中心波长为532 nm，单脉冲能量为450 μJ，激光脉冲的重复频率可达5 kHz；望远镜接收模块采用定制的施密特-卡塞格林望远镜，相较于其它望远镜，该望远镜视野大、成像效果好且集光能力强，对300~800 nm光束的反射率超过90%，可有效捕捉远场的微弱信号；分光模块采用窄带滤光片和偏振分束棱镜的结构，窄带滤光片选用BARR公司的532 nm的超窄带带通滤光片，用于滤除探测光以外的背景噪声，偏振分束棱镜选用THORLABS公司的PBS12-532偏振分光立方体，用于将回波光束分为偏振态*P*光和*S*光，具有高消光比、低损伤阈值和准确性高的优势；探测器选择日本滨松的集成式PMT—H10721-20，该探测器内部集成了用于倍增的高压模块，其在532 nm波长处的量子效率可达100 mA/W；扫描模块选择万腾智能科技有限公司的VT-H100-RF2作为云台，其定位精度为±0.1°，定位角度分辨率为0.01°，扫描速度在0.01°/s~20°/s之间可调，最大负载超过100 kg，通过导电滑环可实现底座与可旋转部件的电源与信号的传输，能实现水平360°的不间断连续扫描。

表1 系统参数

Table 1 Parameters of system

光学发射		分光/偏振		光学接收	
参数	值	参数	值	参数	值
激光器	AOML-500	窄带滤光片	BARR	望远镜	Schmidt-Cassegrain
波长	532 nm	带宽	0.2 nm	直径	254 mm
脉冲能量	>450 μJ	透过率	90%@532 nm	焦距	2 032 mm
脉宽	<13 ns	偏振分束棱镜	PBS12-532	焦比	f/8
重频	5 kHz	透射率	Tp>95%	探测器	H10721-20
光束发散角	0.15 mrad	反射率	Rs>99.5%	光谱范围	230~700 nm
出射光束偏振比	>100∶1	消光比	>3 000∶1	峰值波长	530 nm
扫描参数					
云台型号	VT-H100-RF2	负载	≥100 Kg		
定位角度分辨率	0.01°	旋转速度	0.01°/s~20°/s		
1°的角分辨率、8 s的累计时间完成360°扫描所需时间			48 min		
0.1°的角分辨率扫描、50 MHz采样速率的空间分辨率			17.4 m×3 m		

2.2 高重频激光雷达采集、累计平均的设计及实现

激光雷达在进行森林火灾探测时，需要高速采集每次激光脉冲与大气作用后的回波信号，得到一个回波信号数据链表，如图2所示。其中，采样频率决定距离分辨率，如要获得3 m的距离分别率，需要的采样频率为50 MHz；而数据链表的长度与采样频率共同决定探测距离，当数据链表的长度为4 096、采样频率为50 MHz时，探测距离约为12 km。

激光雷达回波信号中除了较为稳定的目标信号外，通常还包含随机噪声（如背景光、热噪声等），通过多次的累计平均，随机噪声会被削弱，而目标信号会被增强，从而提高信噪比。此外，窄脉冲激光雷达在进行远距离或低反射率目标探测时，回波信号中的目标信号强度较弱，累计平均可以累积固定出现的微弱信号，使其在噪声背景下更容易被检出，所以，累计平均是窄脉冲激光雷达信号处理中关键的、必不可少的步骤，这也是激光雷达特有的

数据处理要求。目前,实现激光雷达回波信号的数据采集、累计平均方法有两种,一种是利用高档示波器,但成本昂贵,不易集成;第二种方法是采用通用板卡,其策略是将单次触发所采集的数据链表进行板载存储,当达到设定的累计次数后,再将其逐一读出后相加求平均。这种方法在读出数据时会有一定的时间开销,并且当激光雷达的重复频率升高到kHz级时,采集和读出会相互制约,目前市面上尚未有可实现kHz级重复频率的商业化激光雷达回波信号采集、累计平均板卡。为解决此问题,本研究提出了一种“读出-累加-存储”IP架构,可在激光雷达重复频率为kHz级时,以50 MHz的采样频率进行采集的同时,实现对获得的数据链表进行数万次的对应点累加。

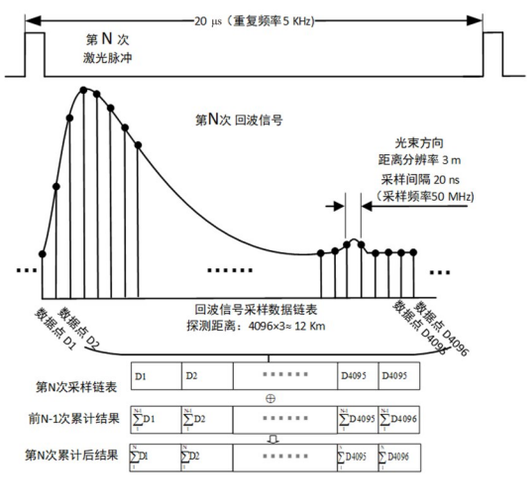


图2　激光雷达采集、累计平均要求

Fig. 2　Requirements of LiDAR acquisition and cumulative average

“读出-累加-存储”IP架构如图3所示,由A/D、双端口RAM和控制模块构成,除A/D外,其余部分均在现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)中构建。工作时,控制模块按照“读出-累加-存储”构想,将其分解成“①采集->②读出->③累加->④存储”四个最基本时序,通过时序控制在采集的同时完成累计。

模块初始化后,在第一次触发来临之前,首先将存储链表的每个存储单元清零。第一次触发时,采集第一数据点,并读出数据链表第一个存储位置的值,两者相加后存入第一存储位置。按照设定的采样频率,将该步骤重复4 096次,完成第一次触发的数据采集。由于第一次触发采集时,对存储链表的每个存储单元进行了清零,所以采集、累加完成后,每个存储单元就是第一次的采样结果。第二次触发来临时,重复第一次触发时的采集、累加处理操作。同理,第二次触发采集时,由于读出了存储链表中每个存储单元的值,所以采集完成后,每个存储单元的值就是第一次、二次采样对应点的采集累加结果。当第N次触发、累计完成后,每个存储单元就是前N次的采样对应点的采集累加结果。当达到设定的累计次数后,将数据链表的数据逐一读出,再除以累计次数就可以得到累计平均值。通过以上的“读出-累加-存储”IP架构,在采样的同时完成累计,并且在达到设定的累计次数时已得到了累加结果,该方法不需要大容量的存储空间,对数据传输的带宽要求也大大下降。

要特别说明的是,由于A/D的转换位数为14位,为保证在进行数以千次的累计后其结果不溢出,加法器和双端口RAM的位数通常要远大于A/D的量化位数。

本模块中,所使用的FPGA是一种内部集成了数万个最基本逻辑、时序单元电路的器件,可通过可编程语言构建各种各样的数字电路,具有并行、可编程的特点。根据不同的需求,双端口RAM的宽度和深度、加法器的位数、采样频率、数据链表长度、累计次数,均可通过可编程语言来实现。

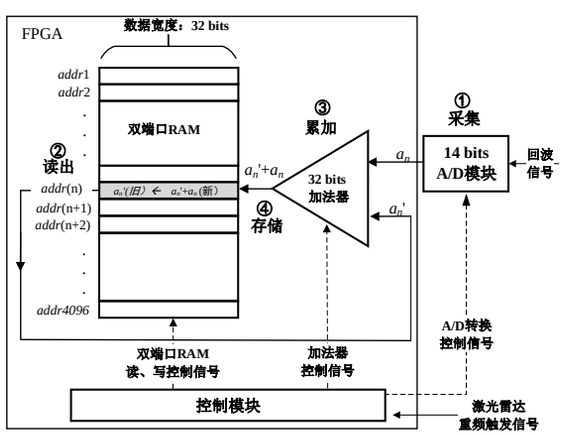


图3　“读出-累加-存储”IP

Fig. 3　The "readout-accumulation-storage" IP

为了验证“读出-累加-存储”IP架构的有效性,将本文设计的采集、累计模块与Tektronix高档示波器DPO5104进行了对比。本模块中,A/D选择的是Analog公司的AD9244,其量化位数为14位,最高采样频率可达65 MHz;FPGA选择的是Altera公司的高性价比Cyclone IV系列中的EP4CE55芯片,该芯片内部集成有5.5 k个基本的逻辑单元、2.3 Mbits

嵌入式存储器等资源。

比对实验时，将重复频率为5 kHz的激光雷达探测回波光信号经PMT转换为电压信号后，同时输入到本采集模块和DPO5104中，获得的单次、累计平均1 k次和4 k次后的波形如图4(a)所示。由图可以看出，一方面，累计平均消除了背景噪声(高频小信号)，显著提升了信噪比；另一方面，本模块的采集、累计结果与DPO5104有较好的一致性，证实了本方法的有效性。图4(b)是两种方法在累计平均4 k次后得到的距离平方矫正信号—RSCS(Range-Squared Correction Signal)，RSCS消除了窄脉冲光束在大气中传输时按距离平方衰减的因子，反映了大气对光束的作用，是进行后续消光系数反演、退偏比计算的基础。图4(b)中，两种方法均在6~7 km处出现了高值，说明此处有云团的存在。此图中，示波器获得的RSCS信号在7 km以外出现很大的波动，说明其有效探测距离已达极限，分析原因，这是由于示波器的A/D的量化位数仅为8位导致的，而本采集、累计平均使用的A/D的量化位数为14位，所以其有效探测距离达可达10 km以上。

3 实验验证

为验证本文所设计的高重频偏振激光雷达森林火灾探测的可行性，开展了模拟火灾探测实验。首先进行了近场探测实验。实验时，将激光雷达安装在陕西省西安市西安理工大学学科二号楼南门(34.256° N，108.992° E)，火点位置在西安理工大学教六楼顶，两者之间的直线距离为400 m左右。实验于2024年1月29日20—22时进行，当日天气晴，东北风2级，为不影响居民和完整扫描火点上方，激光雷达的仰角设置为7°，设置正东方向方位角为0°，水平扫描角度范围为45°~68°，扫描步进角度为1°，距离分辨率是3 m，激光雷达的重复频率为5 kHz，累计脉冲次数为40 k。

图5所示为实验时所获得的波形数据图。其中，图5(a)为方位角为48°~59°范围S光的RSCS信号平面位置显示器(Plan Position Indicator，PPI)伪彩色图像，图中红色调表示信号很强，而蓝色调表示信号偏弱。由图可以明显看出，在400 m处有明显的高值出现。取56°方位角的数据，绘制出S光、P光的消光系数波形如图5(b)所示，图中，红色线为根据标准大气模型获得的大气消光系数的仿真曲线；图5(c)为两路信号相比之后的退偏比信号，两图中的高值显示了火灾的发生。由于本次使用的燃料为纸板混合干枯的树枝、树叶，含水量很低，所以退偏比值较大，最大值约为0.22。

为验证激光雷达系统的远程探测能力，也进行了远场探测实验。实验时，将激光雷达安装在陕西省西安市西安理工大学教学6楼楼顶东侧，距离地面约40 m，火点位置在离激光雷达东南部4 km处的浐河河岸，实验于2024年3月13日晚上23:00至3月14日凌晨1:00进行，当日天气多云。设置正东方向方位角为0°，点火位置位于85°扫描路径上。设置扫描角度为26°~120°，俯仰角度为6.8°，考虑俯仰造成的高度差，雷达与火点位置之间的直线距离约4 km。

图6所示为点火时获得的波形数据图。其中，图6(a)为方位角为48°~67°范围S光的RSCS信号的PPI伪彩色图，由图可以看出，由于建筑物造成遮挡，1.5 km附近产生强回波信号，图中标记为黑色且后面无信号。在图中的61°的4 km处出现回波信

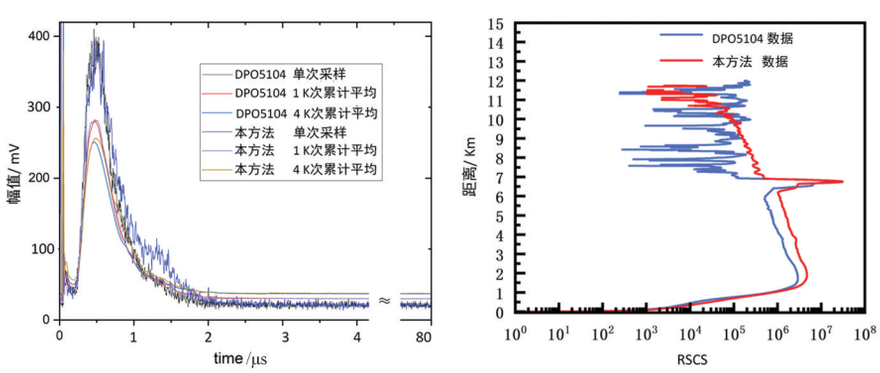


图4 实验结果对比图：(a)单次、1 k次和4 k次的累计平均对比图；(b) 距离平方校正对比图

Fig. 4 Comparison chart of experimental results：(a) cumulative average comparison charts of single time, 1,000 times and 4,000 times; (b) comparison chart of Range-Squared Correction Signal

号高值点,表示该位置有高浓度气溶胶团。图6(b)为方位61°处两路偏振光的RSCS信号,图6(c)为其退偏比信号(退偏比值约为0.23),探测结果表明激光雷达准确地识别到了火点处的烟尘。

在偏振激光雷达的探测性能得到初步验证后,将本激光雷达部署在陕西省延安市,进行了火灾探测实验,如图7所示。延安是中国西北有名的革命圣地,经过多年的退耕还林,森林资源逐渐丰富,但冬季气候干燥,盛行西北风,森林防火需求迫切。延安市区内有宝塔山、清凉山、凤凰山等,市区分为老区、新区,老区主要集中在三座山的川道之间,新区在老区的北部,地势较高。在新区选择靠近延安大学新区的某居民楼(36.638° N, 109.477° E)的18层楼顶安装激光雷达系统,安装位置距地面约为50 m,视野开阔,基本无遮挡,俯仰角为0°时,水平扫描120°的范围可以覆盖延安的大部分老城区,这个区域也是延安市重点防火区域。

实验于2025年3月21日晚19:30—21:40进行,当晚气温1 ℃左右,有间歇性的西北风,设置两个火点,其位置分别位于延安市宝塔区的兴延小区东南部的山顶(36.558°N, 109.507°E)和方塔村附近的山顶(36.569°N, 109.509°E),火点距离激光雷达扫描平面大约200 m,点火所用燃料为林间枝叶、杂草,点火前,先清理周边场地的易燃物,防止因人工点火引发火灾,实验结束后,完全清理火源,以避免余灰复燃。

图8所示是雷达系统在19:48—20:10获得火点区域消光系数、退偏比伪彩色扫描图。该图显示,在半径5.4 km和8.1 km方位角处出现消光及退偏比高值点,即该位置处检测到了高浓度烟尘。经与地图位置比对,高值点位置与火点位置相吻合,证明该系统成功地探测到了火灾的发生。图8(b)中,在5.4 km处的退偏比值在0.1左右,而8.1 km处的退偏比值在0.08左右,经过分析发现,由于8.1 km处火点位置的右下方有一个人工湖,可能是烟尘粒子与水汽进行了混合,导致了退偏比下降。同时,探测也显示了烟尘有向东南方向漂移扩散的趋势,这与当晚轻微的西北风的风向一致。

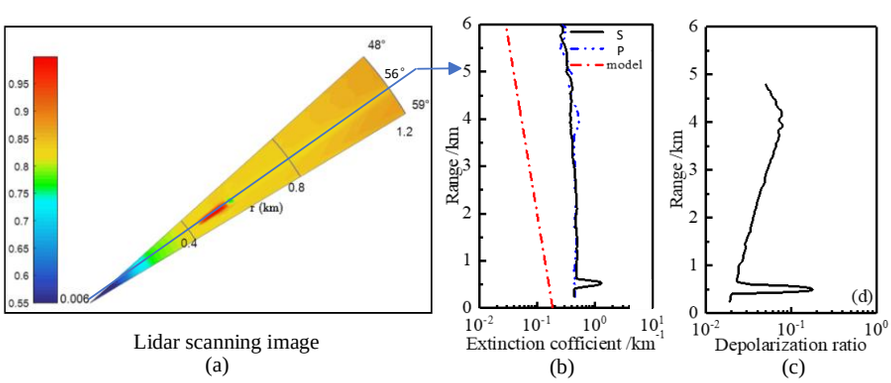


图5　模拟火灾(近场)探测结果:(a) *S*通道RSCS的PPI图;(b) 56°处的消光系数廓线;(c) 56°处的退偏比廓线

Fig. 5　Experimental results of simulated fire(near range): (a) PPI of *S*-channel's RSCS; (b) profile of extinction coefficient at 56°; (c) profile of depolarization ratio at 56°

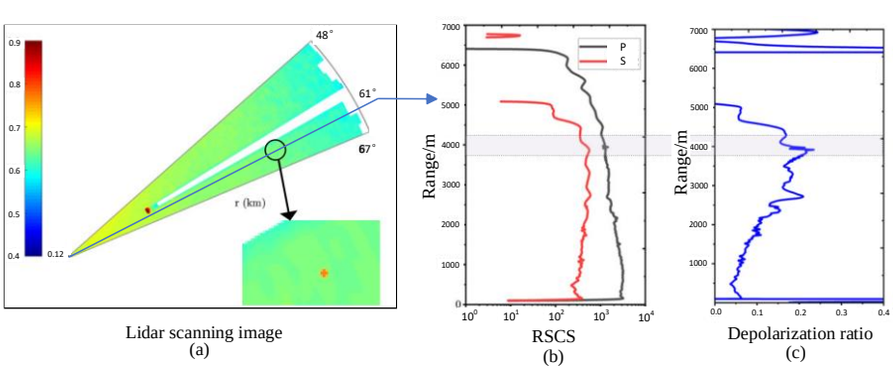
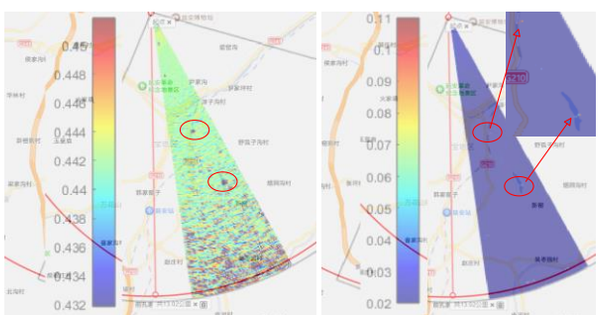


图6　模拟火灾(远场)探测结果:(a) *S*通道RSCS的PPI图;(b) 61°处的RSCS;(c) 61°处的退偏比廓线

Fig. 6　Experimental results of simulated fire(far range): (a) PPI of *S*-channel's RSCS; (b) RSCS at 61°; (c) profile of depolarization ratio at 61°

图7 激光雷达安装位置及现场照片

Fig. 7 Lidar installation position and site photos



(a) (b)

图8 延安模拟点火扫描探测伪彩色图:(a) 消光系数;(b) 退偏比

Fig. 8 Pseudo-color image of Yan'an simulated forest fire scanning: (a) extinction coefficient; (b) depolarization ratio

4 结语

基于森林火灾发生时产生的烟尘粒子的消光、退偏特性,本文设计了一台可以应用于森林火灾探测的扫描偏振激光雷达系统。为了获得较大的探测区域、较高的分辨率和时效性,设计了大功率、高重频激光雷达与高分辨率扫描云台相结合的方案;针对高重频探测时所带来的采集、累计平均难题,提出并设计一种“读出-累加-存储”IP架构,可对重复频率为kHz级的激光雷达回波信号进行高速采集的同时完成累计,设计完成的激光雷达系统能够以5 kHz的重复频率,对半径为10 km的区域进行扫描,当角度分辨率为1°、累计次数为40 k时,完成360°扫描的时间为48 min。搭建完成的激光雷达分别进行了近场、远场模拟烟尘探测试验,实现了0.4 km、4 km处的火点识别,将该激光雷达系统应用于延安市的模拟火灾探测,结果表明,该雷达系统成功地实现了距离分别为5.4 km、8.1 km处的火点烟尘识别,验证了本扫描偏振激光雷达系统森林火灾探测的有效性。

References

[1] Han Yu Ping. The causes of frequent forest fires and prevention and control countermeasures [J]. Disaster Reduction in China, 2024(19): 52-53.
韩玉平. 森林火灾频发的原因及防治对策 [J]. 中国减灾, 2024(19): 52-53.

[2] Yuan Jia Li, Cao Jia Bao, He Sheng Wen, et al. The design and research of air-space-ground forest fire monitoring and warning system [J]. China Emergency Rescue, 2023(06): 32-35+53.
袁嘉栗, 曹家宝, 何胜文, et al. 天空地一体化林火监控预警系统设计与研究 [J]. 中国应急救援, 2023(06): 32-35+53.

[3] Yang Chun Lan, Ning Xin, Xu Hui Kai, et al. Overview of mountain fire monitoring and early warning for power grid demand [J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4765-4777.
杨淳岚, 宁鑫, 徐会凯, 等. 电网山火监测及风险预警技术研究综述 [J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4765-4777.

[4] Xu Wen Jing, Xian Jin Hong, Sun Dong-Song. Polarization lidar system for smoke and dust monitoring and experimental research [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(03): 195-204.
徐文静, 冼锦洪, 孙东松. 用于烟尘监测的偏振激光雷达系统及实验研究 [J]. 红外与激光工程, 2023, 52(03): 195-204.

[5] Alkhatib, Ahmad A A. A review on forest fire detection techniques [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014, 10(3): 597368.

[6] Gu Song Yan, Guo Yang, Xie Xin, et al. Recalibration of the FY-3 microwave payload historical data records [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(10): 2252-2269.
谷松岩, 郭杨, 谢鑫新, 等. 风云三号卫星微波载荷历史数据再定标 [J]. 遥感学报, 2023, 27(10): 2252-2269.

[7] Lu Chun Ling, Bai Zhao Guang, Li Yong-Chang, et al. Technical characteristic and new mode applications of GF 6 satellite [J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(01): 7-14.
陆春玲, 白照广, 李永昌, 等. 高分六号卫星技术特点与新模式应用 [J]. 航天器工程, 2021, 30(01): 7-14.

[8] Dong Yao Hai. Thoughts and prospect on the development of next generation Fengyun Geostationary Meteorogical Satellites [J]. Aerospace Shanghai, 2024, 41(S1): 13-18+64.
董瑶海. 下一代风云静止气象卫星技术发展思考与展望 [J]. 上海航天(中英文), 2024, 41(S1): 13-18+64.

[9] Xu Hai Wen. Application of satellite remote sensing in intelligent forest fire prevention monitoring and warning system [J]. Computing Technology and Automation, 2023, 42(02): 164-167.
徐海文. 卫星遥感在智慧森林防火监测预警系统的应用 [J]. 计算技术与自动化, 2023, 42(02): 164-167.

[10] Chen Zhi Ping. The application of UAVs monitoring in forest fires [J]. Journal of Wildland Fire Science, 2023, 41(04): 135-138.
陈志平. 无人机监测在森林火灾中的应用 [J]. 森林防火, 2023, 41(04): 135-138.

[11] Di Hui Ge, Hua Deng Xin. Research status and progress

of Lidar for atmosphere in China (Invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(03): 9-18.
狄慧鸽, 华灯鑫. 底层大气探测激光雷达国内研究现状与进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(03): 9-18.

[12] Liu Wen Qing, Xie Pin Hua, Hu Zhao Kun, et al. High-sensitivity spectroscopic techniques for atmospheric environment monitoring [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2019, 11(05): 1-7.
刘文清, 谢品华, 胡肇焜, 等. 大气环境高灵敏光谱探测技术 [J]. 环境监控与预警, 2019, 11(05): 1-7.

[13] Utkin A, Fernandes A, Simões F, et al. Feasibility of forest-fire smoke detection using lidar [J]. International Journal of Wildland Fire, 2003, 12: 159.

[14] Leroy-Cancellieri V, Augustin P, Filippi J B, et al. Evaluation of wildland fire smoke plume dynamics and aerosol load using UV scanning lidar and fire – atmosphere modelling during the Mediterranean Letia 2010 experiment [J]. Nat Hazards Earth Syst Sci, 2014, 14(3): 509-523.

[15] Heese B, Hofer J, Baars H, et al. Wild fire aerosol optical properties measured by lidar at Haifa, Israel[C]. EPJ Web of Conferences, 2018 The 28th International Laser Radar Conference (ILRC 28), 176: 05049.

[16] Peshev Z, Deleva A, Dreischuh T, et al. Lidar measurements of wildfire smoke aerosols in the atmosphere above Sofia, Bulgaria [C]. Proc SPIE, 2017, 10226: 102260Y.

[17] Xian J, Xu W, Long C, et al. Early forest-fire detection using scanning polarization lidar [J]. Appl Opt, 2020, 59(28): 8638-8644.

[18] Hua Deng Xin. Progress and application bottlenecks of LiDAR technology for atmospheric detection [C]. The 33rd Annual Conference of the Chinese Meteorological Society, 2016.
华灯鑫. 大气探测激光雷达技术进展及应用瓶颈[C]. 第33届中国气象学会年会, 2016.

[19] Yang Yue Rong. Early forest fire monitoring and warning method and experimental research based on lidar technology[D]. Xi′an: Xi ′an University of Technology, 2023.
杨月蓉. 基于激光雷达技术的早期森林火灾监测预警方法与实验研究[D]. 西安:西安理工大学, 2023.

[20] Zhu Ming Hang. Design and experimental study of lidar system for detecting early fire in the field [D]. Xi′an: Xi′an University of Technology, 2024.
朱明航. 探测野外初期火情的激光雷达系统设计与实验研究[D]. 西安:西安理工大学, 2024.

[21] Gao Ying Chun, Li Shi Chun, Wei Fei Long, et al. New algorithm and analysis of exponential iterative inversion for aerosol Lidar [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(23): 160-168.
高迎春, 李仕春, 魏飞龙, 等. 气溶胶激光雷达的指数迭代反演新算法与分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(23): 160-168.

[22] Wu Wei Wen, Liu Ying, Fang Yi Zhi, et al. Design of laser cleaning device based on Fernald calculation method [J]. Microcomputer Applications, 2022, 38(03): 75-78.
吴伟文, 刘颖, 方义治, 等. 基于Fernald计算方法的激光清扫装置的设计 [J]. 微型电脑应用, 2022, 38(03): 75-78.

[23] Chen Si Ying, Tian Yi Shan, Chen He, et al. Design and simulation of Raman-Mie polarization Lidar system for particle depolarization ratio measurement [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(10): 1091-1095.
陈思颖, 田依杉, 陈和, 等. 粒子退偏比测量拉曼-米偏振激光雷达系统设计与仿真[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(10): 1091-1095.