

引用本文: 李东旭, 孙高飞, 衣文索, 等. 一种便携式米散射激光雷达系统的研制[J]. 光通信技术, 2023, 47(2): 12–16.

一种便携式米散射激光雷达系统的研制

李东旭¹, 孙高飞^{1*}, 衣文索¹, 蒋雨辰¹, 刘宗麟²

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022; 2. 长春大学 电子信息工程学院, 长春 130022)

摘要: 针对传统米散射激光雷达结构复杂和设计成本高的缺陷, 提出一种用来探测大气气溶胶的便携式米散射激光雷达系统。首先设计了收发同轴的光学系统结构, 然后对光电探测器进行了独立设计, 最后基于系统结构搭建了可移动式米散射激光雷达实验平台, 对大气气溶胶进行了初步探测。实验结果表明: 采用设计的电源滤波器滤波后, 开关电源原始纹波电压幅度从 0.1 V 降低到了 0.01 V 内, 噪声幅值控制在 0.1 V 左右; 系统在白天、夜晚的斜程探测距离分别为 4.5、6 km, 可以对特定区域的气溶胶进行实时监测。

关键词: 大气气溶胶; 激光雷达; 系统设计; 回波信噪比

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)02-0012-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.02.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Development of a portable meter scattering lidar system

LI Dongxu¹, SUN Gaofei^{1*}, YI Wensuo¹, JIANG Yuchen¹, LIU Zonglin²

(1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. College of Electronic Information Engineering, Changchun University, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the complex structure and high design cost of traditional meter scattering lidar, a portable meter scattering lidar system for detecting atmospheric aerosols is proposed. First, the optical system structure of coaxial transceiver is designed, and then the photoelectric detector is designed independently. Finally, based on the system structure, a movable meter scattering lidar experimental platform is built to preliminarily detect atmospheric aerosols. The experimental results show that after filtering with the designed power filter, the original ripple voltage range of switching power supply is reduced from 0.1 V to 0.01 V, and the noise amplitude is controlled at about 0.1 V. The oblique detection distance of the system in the day and night is 4.5 km and 6 km respectively, which can monitor the aerosol in a specific area in real time.

Key words: atmospheric aerosol, lidar, system design, echo signal-to-noise ratio

0 引言

大气气溶胶为漂浮在空气环境下的各类固液颗粒物^[1-5], 该类粒子的直径为 0.001~100 μm ^[6]。近年来, 随着我国经济的持续高速发展, 许多地区都出现了以灰霾天气为主的大气污染现象, 导致大气能见度下降, 对人们的生活和社会交通都产生了很大影响。因此, 在我国进行气溶胶时空分布特征的探测研究十

分有意义。传统的气溶胶研究方法需要进行大量的实验采样, 无法满足气溶胶监测时实时性强、范围广的要求。相对于传统的气溶胶研究方法, 遥感探测技术可以解决监测气溶胶时的实时性问题。但是, 在微波雷达、太阳光度计、卫星遥感和激光雷达这 4 种遥感探测技术中, 前 3 种分别因探测不到微小粒子、无法进行夜间测量和空间分辨率低等原因不适合气溶胶监测。激光雷达探测是由地面站点或者机载平台向大气发射一定波长和脉宽的激光光束, 激光光束和气溶胶颗粒相互作用, 通过接收大气后向散射回光得到气溶胶具体的参量数据。由于激光的方向性好、脉冲宽度窄和波长较短, 并且后端探测器的响应灵敏度非常高, 可以获取高时空、高分辨率的大气参数。

近年来, 国内外的许多学者对激光雷达大气气溶

收稿日期: 2022-05-17。

作者简介: 李东旭(1996—), 男, 硕士研究生, 河南驻马店人, 现就读于长春理工大学光电工程学院电子信息专业, 主要从事大气激光传感技术、现代光纤传感技术、光电转换技术的研究以及微弱信号的检测与处理。

*** 通信作者:** 孙高飞(1985—), 女, 汉族, 博士, 教授, 从事航天地面模拟实验与标定技术的研究工作。



李东旭,孙高飞,衣文索,等:一种便携式米散射激光雷达系统的研制

胶探测进行了深入的研究。赵欢等人^[7]搭建了一套多波长米散射激光雷达系统,反演出了当地垂直距离 5 km 以内的气溶胶消光廓线。曹念文等人^[8]使用米-喇曼散射激光雷达得到了有云和无云时的气溶胶消光系数廓线。王界等人^[9]研制的米散射激光雷达大大减小了近距离的探测盲区。MICHAEL E 等人^[10]研制的激光雷达对撒哈拉以南矿物尘埃的光学性质进行测量,得到了它们的后向散射系数和消光系数。SUGIMOTO N 等人^[11]开发出一种可以观测大气边界层结构的眼安全紧凑型米散射激光雷达。但是这些气溶胶探测实验系统大多结构复杂,只能在实验室或者专用场所进行实验研究,而且造价昂贵,尤其是光电倍增管(PMT)光子计数器的价格不菲且探测器有较高的偏置要求,在工程中很难得到广泛应用。因此,本文设计一套光路简单且成本低的便携式米散射激光雷达系统,光源与离轴抛物面镜采用同轴设计,简化系统结构。

1 米散射激光雷达系统

1.1 激光雷达大气气溶胶探测原理

激光在大气传输中与气溶胶粒子群发生相互作用,由于气溶胶粒子群密度差异很大,对光的能量会产生不同程度的衰减,在各个方向上也会产生不同程度的散射。因此,研究激光雷达探测大气气溶胶的实质就是研究不同空间尺度下气溶胶粒子群对光能量的散射和吸收特性,即研究一定空间尺度下气溶胶粒子对光的消光情况。当激光雷达通过向空间发射一定脉冲宽度的激光时,可以利用接收装置来获取后向散射光,分析激光雷达方程,获取相应的大气参数。激光雷达方程中包含影响回波信号强度的各种因素,一般认为,影响回波信号的主要因素由两部分组成:一部分是激光发射接收装置,另一部分是外界大气。米散射激光雷达方程^[11-15]可表示为

$$P(R) = CP_0 \frac{A}{R^2} \Delta R \beta_{\pi}(R) T^2(R) \quad (1)$$

其中, P_0 、 C 分别表示激光雷达发射的单脉冲激光功率和激光雷达系统常数(下文仿真时 C 默认为 1), A 为激光雷达的有效接收面积, R 为探测距离, ΔR 为激光雷达的空间分辨率, $\beta_{\pi}(R)$ 为大气后向散射系数, $T(R)$ 为透过率。当对恒定路径的消光系数进行积分时,可以获得不同高度下的大气透过率^[16],如式(2)所示。

$$T(R) = \exp\left[-\int_0^R \delta(r) dr\right] \quad (2)$$

其中, $\delta(r)$ 为距离 r 处的气溶胶的消光系数。

从式(2)、式(3)可知,大气后向散射系数和消光系数是 2 个重要的大气参数,对接收到的雷达数据进行适当的算法反演^[17],可以得到不同高度下的消光系数。

1.2 激光雷达系统设计

本文基于米散射理论基础提出了一种米散射激光雷达气溶胶探测系统,如图 1 所示。系统由激光发射单元、光学接收单元和信号处理单元组成。为了减小系统的复杂程度,光学接收单元采用表面镀金膜的 90°离轴抛物面反射镜对散射回光进行聚焦;激光发射单元和接收单元则采用同轴设计,激光光束从反射镜中间的小孔中出射,此时激光光轴和反射镜光轴几乎在同一条直线上,可以保证散射回光一开始就进入接收视场范围,比非同轴系统具有探测盲区小的优势;经聚焦后的散射光由带滤光片封装的雪崩光电二极管(APD)探测,产生电流信号经跨阻放大器转换为电压信号;电压信号经多级放大调整后输入采集卡采集,最后由计算机对采集后的信号进行数据处理。米散射激光雷达系统的具体参数如表 1 所示。

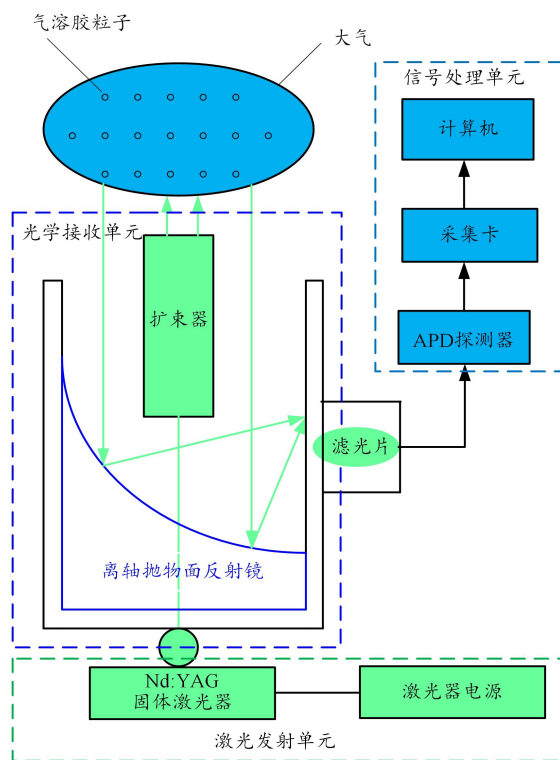


图1 米散射激光雷达气溶胶探测系统框图

1.3 APD 探测器设计

在进行远距离的气溶胶探测时,激光脉冲能量衰减比较大,回光比较微弱,而且气溶胶的空间分布特征变化比较快。为了满足低光强、高速率的探测需求,本文设计了用于探测回波信号的 APD 探测器,其原理图

李东旭,孙高飞,衣文索,等:一种便携式米散射激光雷达系统的研制

表 1 米散射激光雷达系统参数

器件名称	器件参数	数值
Nd:YAG 固体激光器	波长 /nm	532
	光束发散角 /mrad	0.8
	脉冲宽度 /ns	20
	脉冲能量 / μ J	17
	光斑直径 /mm	2
	外观尺寸 /cm	15×8×6
离轴抛物面反射镜	口径 /mm	100
	反射焦距 /mm	150
	有效通光孔径	>90%机械半径
	反射率	>97%@532 nm
APD	波长响应范围 /nm	400~1 100
	峰值波长 /nm	905
	带宽 /GHz	1.25
	光敏面 /mm	0.5
	封装	TO46 Can

如图 2 所示。该探测器主要由 APD 驱动电路、跨阻放大电路、低通滤波电路和同相放大电路组成。APD 是实现光/电转换的核心部件,其对偏置电压的要求极苛刻,不能太高也不能太低,偏置电压太高会加大暗电流噪声,偏置电压太低会导致雪崩效应减弱,两者都会降低信号的信噪比。跨阻放大电路主要实现光电流/电压转换,电路采用 OPA657 型号芯片,该芯片具有高增益、低失真的特点,增益带宽达到 1.6 GHz,非常适合在第一级对光电流进行电压转换。低通滤波电路主要用于滤除混杂在信号中的高频噪声。最后一级同相放大电路的作用主要是使信号的幅值放大到模/数转换所能采集到的电压范围。

2 实验系统搭建和数据分析

根据图 1 所示的系统框图,本文搭建了米散射激光雷达实验平台如图 3 所示,主要包括光源模块、探测器模块、示波器、光学对焦镜筒和电源滤波器。其中,离轴抛物面镜嵌在光学对焦镜筒里面,与光源模块中的激光器相连,探测器模块为带滤光片封装的 APD;光学对焦镜筒和电源滤波器的设计原理如下。

2.1 光学对焦镜筒设计

为了降低系统的复杂程度,本文设计了光学对焦镜筒结构如图 4 所示。由于离轴抛物面镜的光学聚焦点在一侧,且焦点固定,光电探测时需要把焦点与探测

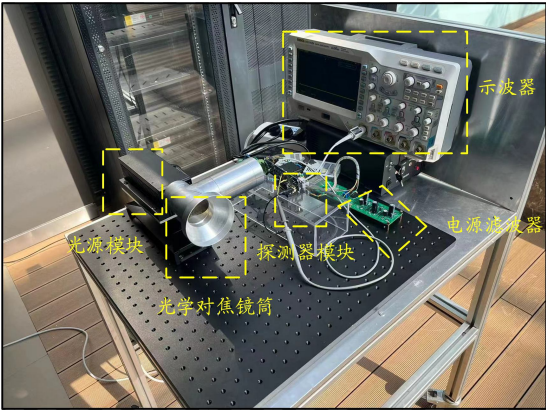


图 3 米散射激光雷达实验平台

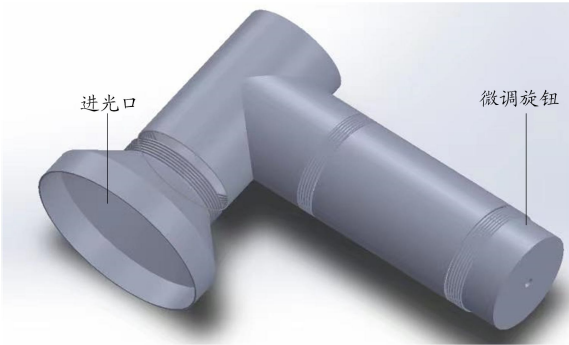


图 4 光学对焦镜筒结构建模

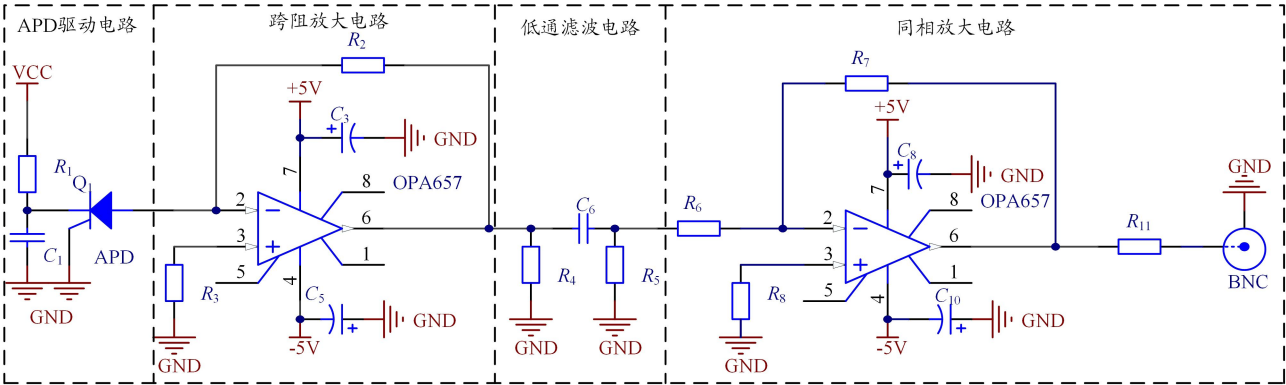


图 2 APD 探测器原理图

器的光敏面进行对准, 若未对准, 即使细小的偏差也会影响回波信号的质量, 从而降低系统信噪比。本文设计的光学对焦镜筒结构侧面的微调旋钮可以进行微调, 方便探测器的光敏面与焦点进行初对准。

2.2 电源滤波器设计

由于本文设计的光/电转换电路采用的电源是开关电源, 对于微弱信号的探测, 开关电源的纹波噪声会对信号的放大产生影响, 也会影响信号的稳定性。因此, 在信号放大之前有必要对电源进行一定的滤波处理。本文设计的电源滤波电路如图 5 所示。该滤波器为两级 LC 滤波电路组成的无源滤波器, 可以有效地滤除开关电源中的谐波, 也可以对现场环境中的瞬态脉冲干扰进行有效抑制。

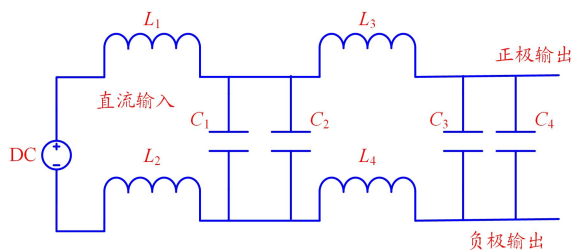


图 5 电源滤波器设计

2.3 数据分析

由于白天杂散光比较多, 更有利于验证系统的可行性和滤波器的滤波效果, 因此实验选择在白天进行。开关电源的原始电源纹波如图 6 所示, 原始纹波电压幅度在 0.1 V 内。采用本文设计的电源滤波器滤波后的纹波如图 7 所示。可以看出, 纹波电压幅度降低到了 0.01 V 内, 大大降低了因电源纹波带来的噪声。

由于激光雷达在白天探测时存在许多的杂散光, 且探测器的光敏面与反射镜的焦点难以精确对准, APD 探测器存在较多的暗电流噪声, 开关电源噪声也

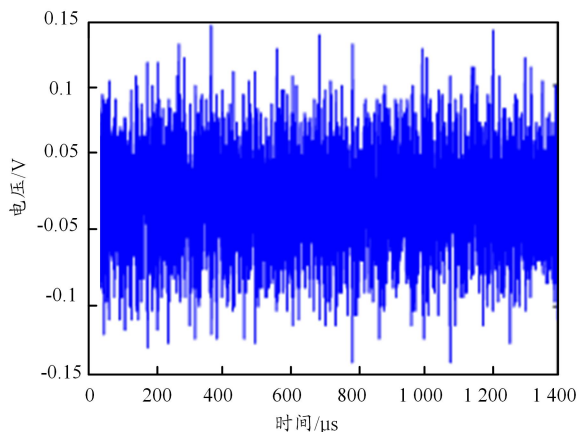


图 6 开关电源原始纹波

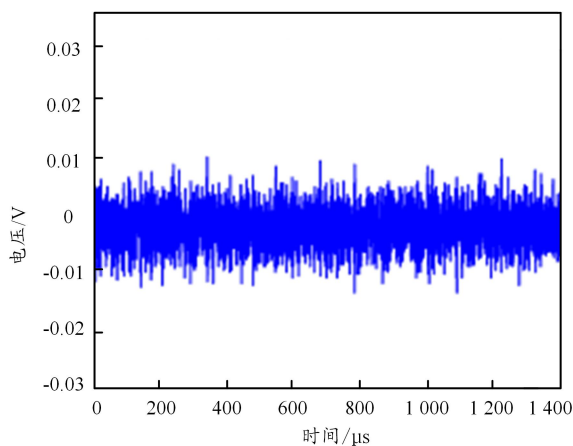


图 7 滤波后的纹波

会引起系统信噪比的降低, 得到的未对准滤波的激光脉冲回波信号如图 8 所示。可以看出, 信号幅值不足 2 V, 而噪声的幅值将近 1 V (图中浅蓝色部分), 信噪比非常低。采用电源滤波器和光学对焦镜筒后, 得到的激光脉冲回波信号如图 9 所示, 回波信号的幅值达到了 3 V 左右, 且噪声幅值控制在 0.1 V 左右, 信噪比

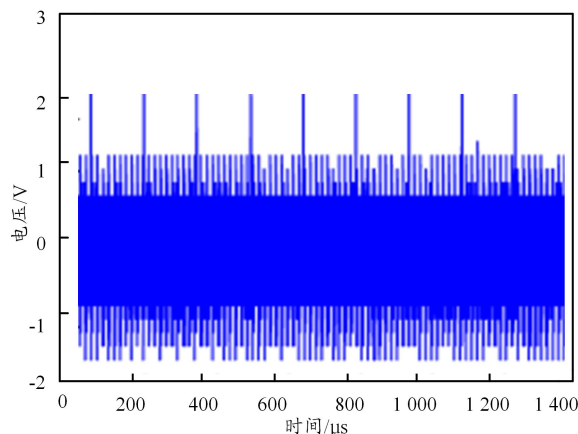


图 8 未对准滤波的激光脉冲回波信号

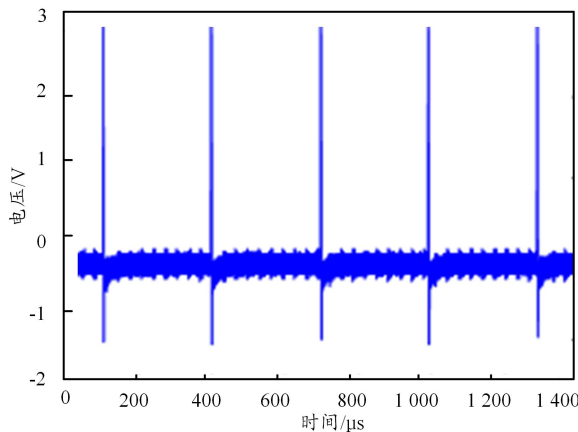


图 9 经对准滤波后的激光脉冲回波信号

李东旭,孙高飞,衣文索,等:一种便携式米散射激光雷达系统的研制

提升明显,降低了后续信号处理和算法的难度。

2022年3月5日白天,本文对该系统进行了一次斜程探测,实验探测条件为:系统仰角为 60° ,采样频率为100 MHz/s,单次采样点数为5 000,得到大气回波信号曲线如图10所示。可以看出,随着距离的增加,信号的幅值逐渐降低,在4.5 km处信号的幅值降低到0。

2022年3月5日夜,在不改变任何参数的情况下进行了一次对比测试,得到相应的大气回波信号曲线如图11所示。可以看出,由于夜间杂散光的减少,信号的幅值比白天大,探测距离达到了6 km,比白天探测的远。

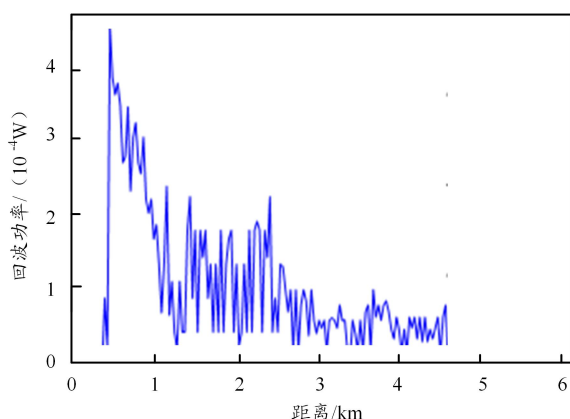


图10 2022年3月5日白天大气回波信号曲线

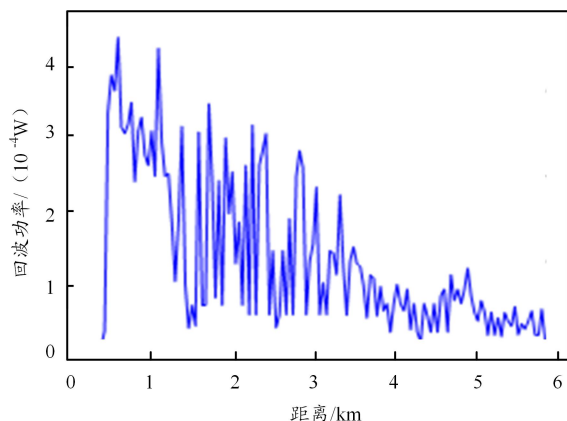


图11 2022年3月5日夜晚上大气回波信号曲线

3 结束语

本文设计了一套米散射激光雷达系统并搭建了实验平台,实验结果表明:所设计的电源滤波电路的滤波性能和光学对焦镜筒可靠性较高;系统在白天、

夜晚的斜程探测距离分别为4.5 km、6 km。本文为米散射激光雷达系统设计提供了一种新思路,且该系统具有结构设计简单、集成化装调比较容易、体积小、成本非常低等优点,可以为大规模的工程应用提供参考。

参考文献:

- [1] 高飞. 激光雷达精细探测大气气溶胶研究[D]. 西安:西安理工大学, 2008.
- [2] 迟如利,吴德成,刘博,等. 双波长米散射激光雷达探测对流层气溶胶消光特性[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(6): 1468-1472.
- [3] 夏俊荣,张镭. Mie 散射激光雷达探测大气气溶胶的进展[J]. 干旱气象, 2006(4): 68-72, 81.
- [4] 陈敏. 气溶胶消光系数空间分布及斜程能见度的激光雷达探测[D]. 苏州:苏州大学, 2006.
- [5] 徐黎明. 大气气溶胶探测小型 Mie 散射激光雷达系统的设计[D]. 西安:西安理工大学, 2008.
- [6] 赵静. 激光雷达与太阳光度计精细反演气溶胶光学及微物理特性研究[D]. 西安:西安理工大学, 2019.
- [7] 赵欢. 多波长米散射激光雷达气溶胶探测技术研究[D]. 西安:西安理工大学, 2014.
- [8] 虞历尧,曹念文,沈吉. Rayleigh-Raman-Mie 激光雷达探测南京北郊对流层气溶胶光学特性[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 72-79.
- [9] 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.
- [10] MICHAEL E, MARTIN W, ANDREAS F, et al. Airborne high spectral resolution lidar for measuring aerosol extinction and backscatter coefficients[J]. Appl. Opt., 2008, 47(3): 346-358.
- [11] SUGIMOTO N, MATSUI I, SHIMIZU A, et al. Lidar network observations of tropospheric aerosols[EB/OL]. [2022-05-17]. <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/7860/1/Lidar-network-observation-of-tropospheric-aerosols/10.1117/12.869900.short?SSO=1>.
- [12] 张寅超,李丹,陈炳龙,等. 基于 CALIPSO 和转动拉曼 - 米散射激光雷达研究北京地区大气气溶胶特性 [J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(6): 634-637, 643.
- [13] 康翔宇,郭骥,曾祥培,等. 基于米散射激光雷达的大气气溶胶检测系统设计[J]. 光学仪器, 2021, 43(2): 66-71.
- [14] 滕曼,庄鹏,张站业,等. 大气气溶胶污染监测中应用的新型全天时户外型拉曼 - 米散射激光雷达系统 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(7): 67-73.
- [15] 刘东,杨雨英,周雨迪. 大气遥感高光谱分辨率激光雷达研究进展[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2535-2546.
- [16] 钟志庆,周军. 微脉冲激光雷达探测信号的数值模拟计算[J]. 量子电子学报, 2003(5): 618-622.
- [17] 柳云雷,李华,陈玉宝,等. 基于 Femald 方法 532 nm 激光雷达气溶胶探测试验[J]. 电子设计工程, 2014, 22(16): 88-90.