

中高层大气激光雷达安全运行天气判别系统

魏俊风¹, 程学武², 杨国韬³, 詹伟强⁴, 林兆祥^{1*}¹中南民族大学电子信息工程学院, 湖北 武汉 430074;²中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 湖北 武汉 430071;³中国科学院国家空间科学中心空间天气学国家重点实验室, 北京 100190;⁴武汉七斗光电科技有限公司, 湖北 武汉 430071

摘要 环境天气的突然变化会对观测中的中高层大气激光雷达造成严重危害, 为了确保中高层大气激光雷达的安全运行, 需要实时监测激光雷达台站的天气状况。基于夜空图像分析仪和本地气象站, 结合数字图像处理技术, 开发一套自动化天气判别系统。该系统能够实时判断当前天气状况是否满足激光雷达的观测条件, 并对未来 2 小时内可能出现的恶劣天气做出及时预警。依据试运行一年的连续观测结果, 该系统能够正确地判断当前天气状况, 可以满足中高层大气激光雷达自动化运行的需求, 具有较高的稳定性和实用性。

关键词 激光雷达; 天气判别; 观测条件; 软件设计

中图分类号 TN958

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221378

Weather Identification System for Normal Running of Middle and Upper Atmosphere Lidar

Wei Junfeng¹, Cheng Xuewu², Yang Guotao³, Zhan Weiqiang⁴, Lin Zhaoxiang^{1*}¹College of Electronics and Information Engineering, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, Hubei, China;²Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China;³State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;⁴Wuhan TopStar Optronics Technology Co., Ltd., Wuhan 430071, Hubei, China

Abstract Sudden weather changes can endanger the middle and upper atmosphere lidar in observation. Hence, to ensure the safe operation of the lidar, the weather conditions of stations need to be monitored in real-time. Consequently, this paper develops an automatic weather identification system for a local weather station, using a night-sky image analyzer with digital image processing technology. Investigations reveal that the system can judge in real time whether the current weather conditions meet the lidar's observational conditions, subsequently giving an early warning when it will become bad weather in the next two hours. Furthermore, the continuous observation results of trial operations for one year show that the proposed system can meet the middle and upper atmosphere lidar automatic operation requirements with high stability and practicability.

Key words lidar; weather discrimination; observational condition; software design

1 引言

中高层大气激光雷达主要用于探测地表以上 30~120 km 高空大气的活动情况, 是开展大气金属层探

测、中性与电离成分耦合、大气波动传播及非线性相互作用等科研课题研究必备的光电设备^[1-4]。中高层大气激光雷达对运行环境的要求比较高, 只有在晴朗的夜空才能获得有效的回波信号^[5-6]。在观测过程中, 如

收稿日期: 2022-04-21; 修回日期: 2022-05-18; 录用日期: 2022-06-22; 网络首发日期: 2022-07-03

基金项目: “十三五”国家重大科技基础设施国家自然科学基金(子午工程二期)(41474130, 41627804, 41604130)

通信作者: *lin_zhaox@126.com

果遇到多云、轻度雾霾等天气,获取的数据难以用于科学研究^[7];如果遇到较剧烈的天气变化(如大风、雨、雪等)并且不能及时应对,会对设备造成不可弥补的损坏^[8]。因此,对天气状况进行实时判别和预报,是激光雷达安全高效运行的重要保证,是提高激光雷达探测效率的关键技术之一。

天气预报是使用现代科学技术对地球上某一片区域大气层的未来状态的预测,通过使用气象站收集的大量气象数据(包括气温、湿度和气压等),结合天气学(天气学是研究天气现象和天气过程的物理本质及规律,并用以制作天气预报的学科)的相关知识来预测未来大气的变化^[9-10]。由于地球大气变化过程极为复杂,影响因素众多,大气变化过程的发生发展规律还有待完善,因此通常天气预报具有一定误差。《中国气象报》报道,目前我国 24 小时晴雨预报准确率仅为 85.9%,而且精确预报的范围仅为 5 km 左右^[11]。由于目前已经建成(或即将建成)的激光雷达台站多数都远离气象观测站,有些激光雷达台站甚至距离气象观测站数十千米,同时,激光雷达观测对特定位置(台站上空)天气预报的准确性和时效性要求非常高,突发性的局部大风或小范围局部降水都将对相关设备造成严重损坏,影响中高层大气激光雷达的安全运行。因此,常规天气预报的结果不能完全满足激光雷达日常运行的需求^[12-15]。

在中高层大气激光雷达的观测过程中,为了防止低层大气活动产生的雨水、雪和固体颗粒物损坏望远镜等精密设备,需要对中高层大气激光雷达正上空的天气现象进行实时准确的观测,对未来 2 小时内可能出现的恶劣天气提前进行预警和采取相应措施。这项工作一般由具有丰富工作经验的值守人员依据现场气象条件进行判断和操作来完成,而且需要在夜间(值守期间)随时留意室外天气情况,加大了值守人员的工作强度,给中高层大气激光雷达的无人化值守和智能化运行带来了极大挑战。

对此,本文依托子午工程延庆台站,设计了一套中高层大气激光雷达天气判别系统。该系统由本地气象站、夜空图像分析仪^[16]和天气判别软件组成。使用 Python 爬虫技术,结合云端天气预报数据,对未来 2 小时内可能出现的恶劣天气进行预警。应用串口通信技术和数字图像处理技术,实现了对激光雷达工作区域天气状况的全方位监测,准确判断出当前天气是否符合激光雷达的运行要求,为激光雷达的安全运行提供技术保障。

2 原理和方法

针对延庆激光雷达台站的实际情况,开发了一套天气判别系统,对激光雷达台站的气象状况进行多尺度监测,可以获取风速、雨量、湿度等气象数据,对当前气象状况是否适宜激光雷达开机观测进行实时判别和预报,为中高层大气激光雷达系统的安全运行提供保障。

2.1 云端天气数据

选取中国气象局网站的云端天气预报信息作为数据来源,通过 Python 爬虫技术获得中高层大气激光雷达台站所在区域大范围的天气情况,包括实时更新的温湿度情况、风速风向情况、云量情况、降水强度、降水概率和 PM_{2.5} 浓度等天气数据。

网络爬虫是一种按照某些规则,自动抓取互联网上目标信息的程序或者脚本^[17]。因此,进行爬虫设计的前提是明确目标天气信息,这就需要对目标气象网站的网页结构进行分析。定位到中高层大气激光雷达台站所在地区后,对天气预报网页的相关元素进行分析,定位目标信息在网页 HTML 代码中相应字段的标签位置。图 1(a)为中国气象局网站(<https://weather.cma.cn/web/weather/54406.html>)中延庆地区大气压强、湿度、降水等目标信息在网页中的位置,定位目标信息所在的标签,同理可以找到风速、风向、云量等目标信息所在的标签位置。

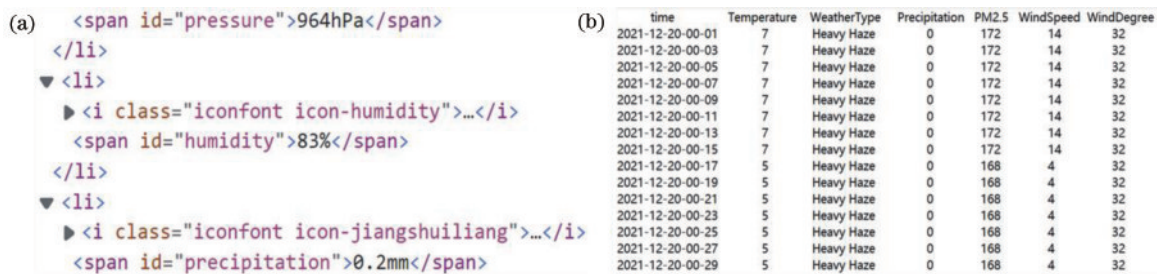


图 1 网页气象信息和部分气象数据。(a)网页气象信息;(b)部分气象数据

Fig. 1 Web weather information and part of the weather data. (a) Web weather information; (b) part of the meteorological data

明确目标气象信息在气象网页中的存储位置后,使用 Python 的相关库函数对目标气象信息进行获取,对获取的气象信息进行数据清洗操作,处理重复值、缺失值和数据不一致的情况^[18]。因为同一种类的天气信

息可能在网页中出现多次,对于气象数据中重复的数据值,删除多余的数据;对于数据值缺失的情况,用特殊字符进行填充处理;对于气象数据中单位不一致或命名规则不一致的情况,通过字符串查找、切片以及替

换的方法进行处理。图 1(b)为处理后的云端气象数据部分展示。

相比于传统的通过人工来监测激光雷达台站附近气象环境的方式,由 Python 爬虫通过气象网站自动获取云端气象数据的方式有着操作简单、运行高效快捷的优势。确定激光雷达台站所在区域后,便可直接获取天气信息并进行初步的数据处理,提高了获取云端天气信息的效率,降低了值守人员的工作强度。

2.2 本地气象站

为了进一步获得激光雷达观测点上空的实时气象状况,在延庆激光雷达台站搭建了一个小型气象站,该

气象站包含图 2(a)所示的风速传感器、图 2(b)所示的风向传感器、图 2(c)所示的气象百叶窗和图 2(d)所示的雨滴传感器等设备,用以实时探测激光雷达台站的温度、湿度、风向、风速和 $PM_{2.5}$ 等气象数据。

结合本地气象站各设备的主要技术参数,如表 1 所示,可知各设备的测量量程够大,检测精度较高,同时具备较好的抗外界干扰能力,可以满足延庆台站的实际使用需求。将上述设备安装在延庆激光雷达台站楼顶处,并添加避雷针进行防雷处理。上位机通过串口通信技术获取气象站数据。

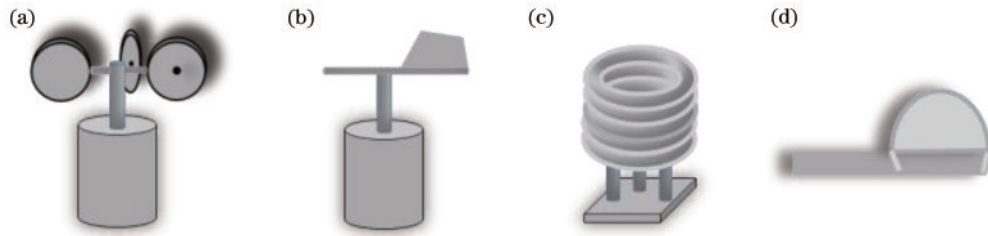


图 2 本地气象站设备。(a)风速传感器;(b)风向传感器;(c)气象百叶窗;(d)雨滴传感器

Fig. 2 Local weather station equipment. (a) Wind speed sensor; (b) wind direction sensor; (c) instrument shelter; (d) rain sensor

表 1 本地气象站各设备的技术参数

Table 1 Technical parameters of local weather station equipments

Device name	Technical parameter	Value range
Wind speed sensor	Start wind speed / ($m \cdot s^{-1}$)	≤ 0.5
	Resolution ratio / ($m \cdot s^{-1}$)	0.1
	Measuring range / ($m \cdot s^{-1}$)	0-70.0
Wind direction sensor	Start wind speed / ($m \cdot s^{-1}$)	≤ 0.5
	Resolution ratio / ($^{\circ}$)	1
	Measuring range / ($^{\circ}$)	0-360
Instrument shelter	$PM_{2.5}$ measuring range / ($\mu g \cdot m^{-3}$)	0-500
	$PM_{2.5}$ resolution ratio / ($\mu g \cdot m^{-3}$)	1
	Temperature measuring range / $^{\circ}C$	-40-70
	Temperature resolution ratio / $^{\circ}C$	0.1
	Humidity measurement range / %	0-100
	Humidity resolution ratio / %	0.1
Rain sensor	Barometric pressure measuring range / hPa	10.0-1100.0
	Barometric pressure resolution ratio / hPa	0.1
	Large instantaneous rainfall / ($mm \cdot s^{-1}$)	0.4
	Resolution ratio / ($mm \cdot s^{-1}$)	0.1

本地气象站可以对安装区域内激光雷达台站的气象状况进行实时精准的监测,避免激光雷达台站遭遇突发恶劣天气时,值守人员无法及时启动中高层大气激光雷达智能化运行系统而导致的相关科研仪器损坏。

2.3 夜空图像分析仪

除了本地气象站的风场、雨量、温度、湿度等,与激光雷达观测关系密切的还有激光雷达观测站上空大气云量参数,云的多少直接影响激光雷达光学透射率,也就影响了激光雷达的大气探测能力。在云量较厚时,激光无法穿透云层,直接影响到高空激光雷达的回波信号的获取。从定性角度讲,在晴朗的夜间,天空中的星星数量较多,而在多云、雾霾等天气条件下,天空中的星星数量稀少甚至看不见,这是因为云层对可见光是不透明的,导致星星的可见光无法穿透到地面。地球位处由几千亿颗恒星组成的银河系内,上空分布数量众多的恒星,这些恒星的分布从星图中可以获得。在任意时刻,激光雷达台站正上方的星星数量由地球经纬度查表星图可知。因此星星数量在一定程度上反映当前的天气情况^[19]。本实验团队开发了一款夜空图像分析仪,如图 3(a)所示,结构包括石英球形罩、工业相机、散热风扇、支撑杆、金属底座等硬件装置。为提高对星星的分辨能力,采用 2000 万像素的工业面阵相机作为核心部件,其分辨率为 5472×3648 ,增益范围为 0~20 dB,曝光时间为 $46 \mu s \sim 2 s$,可配合大曝光范围调整增益,能够清晰地捕捉实时夜空图像。同时,结合相机的 Software Development Kit (SDK) 二次开发包,可以根据使用需求开发相机的控制模块。

对于夜空图像分析仪获取的夜空图像,如图 3(b)所示,首先进行图像切割、灰度化处理、膨胀腐蚀^[20]、拉普拉斯变换^[21]等处理,然后对得到的图像进行直线检测和孤立点检测。直线检测能够去除激光束对星星数量检测的干扰,孤立点检测能够获取图像中可识别的

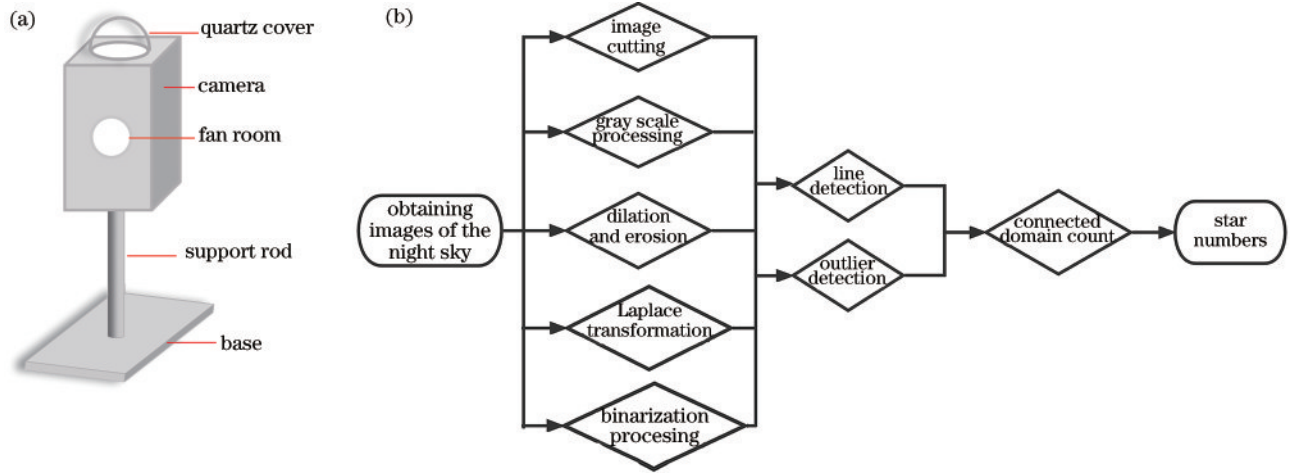


图 3 夜空图像分析仪。(a)模型图;(b)算法流程图

Fig. 3 Night-sky image analyzer. (a) Model map; (b) algorithm flow chart

星星数量。结合夜空图像分析仪获取的大量延庆台站上空的图像数据,通过模式分类的方法,将星星数量划分为适宜开机阈值、不能开机阈值、持续关注阈值3类。

3 实现与分析

3.1 天气判别系统的实现

在能够获取激光雷达台站气象数据的基础上,如表2所示,对天气情况进行划分。其中,天气晴朗的判

表 2 不同天气分级标准

Table 2 Classification criteria for different weather

Type of weather	Standard of weather
Clear day	$C \leq 20\%$
Partly cloudy day	$20\% < C \leq 80\%$
Cloudy	$80\% < C$
Light haze	$100 \mu\text{g}/\text{m}^3 < C_{\text{PM}_{2.5}} \leq 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Moderate haze	$150 \mu\text{g}/\text{m}^3 < C_{\text{PM}_{2.5}} \leq 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Heavy haze	$200 < C_{\text{PM}_{2.5}}$
Light rain	$0.08 \text{ mm}/\text{h} < P \leq 3.44 \text{ mm}/\text{h}$
Moderate rain	$3.44 \text{ mm}/\text{h} < P \leq 11.33 \text{ mm}/\text{h}$
Heavy rain	$11.33 \text{ mm}/\text{h} < P \leq 51.30 \text{ mm}/\text{h}$
Storm rain	$51.30 \text{ mm}/\text{h} < P$
Fog day	low visibility, high humidity, low wind speed, low temperature
Light snow	$0.08 \text{ mm}/\text{h} < P \leq 3.44 \text{ mm}/\text{h}$
Moderate snow	$3.44 \text{ mm}/\text{h} < P \leq 11.33 \text{ mm}/\text{h}$
Heavy snow	$11.33 \text{ mm}/\text{h} < P \leq 51.30 \text{ mm}/\text{h}$
Storm snow	$51.30 \text{ mm}/\text{h} < P$
Dust day	$150 < I, 150 < C_{\text{PM}_{10}}, H < 30\%, S \leq 6 \text{ m}/\text{s}$
Sand day	$150 < I, 150 < C_{\text{PM}_{10}}, H < 30\%, S > 6 \text{ m}/\text{s}$
Wind day	$8.0 \text{ m}/\text{s} < S$

断标准是实时的云量(C)情况;雨雪强度是以单位时间内降水强度(P)进行判断的;雾天是以能见度低、湿度高、风速低、温度低等天气标准进行综合判断的;雾霾天气以大气中直径小于或等于 $2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)的含量($C_{\text{PM}_{2.5}}$)为标准进行判断;沙尘、浮尘天气是以空气质量指数(I)、大气中直径小于或等于 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒物的含量($C_{\text{PM}_{10}}$)、湿度(H)、风速(S)为标准进行综合判断的。

根据以上的天气类别,结合中高层大气激光雷达观测过程中的实际情况,将天气划分为适宜开机天气,此时天气处于晴朗或少云,并且星星数量大于适宜开机阈值;持续关注天气,此时天气处于阴天、轻度雾霾、雾3种天气之一,并且星星数量大于持续关注阈值;不能开机天气,此时天气处于小雨、中雨、大雨、暴雨、小雪、中雪、大雪、暴雪、大风、中度雾霾、重度雾霾、浮尘、沙尘13种天气之一,并且星星数量小于不能开机阈值。同时,系统的判别流程如图4所示,云端天气数据获取模块、本地气象站各硬件设备及夜空图像分析仪同步启动,根据实时天气类别和未来2小时内天气状况,将系统判别的结果分为适宜开机、不能开机和持续关注3类。其中,适宜开机表明此时台站处于适宜开机天气,并且云端天气数据显示2小时内没有恶劣天气;不能开机表明此时台站处于不能开机天气,或者2小时内将出现恶劣天气,为了保证设备安全,中高层大气激光雷达不能开机观测;持续关注表明当前激光雷达台站处于持续关注天气,虽然激光雷达开机观测后并不能获得十分优质的数据,但是由于某些特殊的科研工作需求,需要开启激光雷达获取回波信号数据,为了防范开机过程中天气突然的变化,值守人员应该持续关注室外天气变化,避免造成相应的损失。

中高层大气激光雷达天气判别软件(如图5所示)主要用于帮助值守人员查看当前台站的天气情况,针对当前气象环境是否适宜激光雷达开机观测,给出判

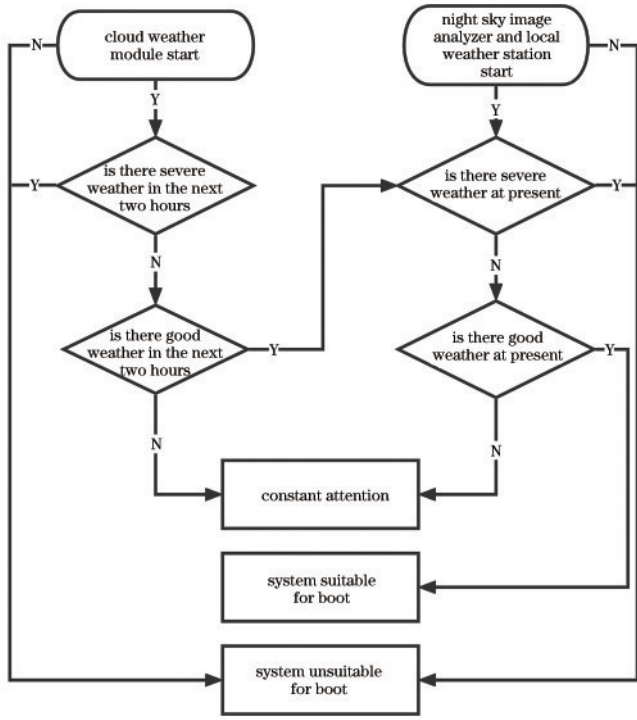


图 4 激光雷达天气判别系统逻辑示意图

Fig. 4 Logic diagram of lidar weather discrimination system

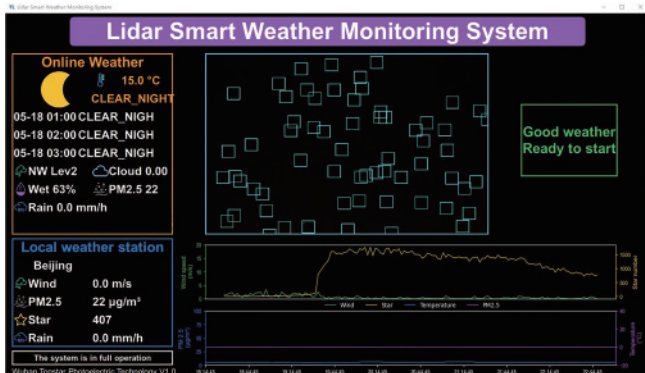


图 5 天气判别软件

Fig. 5 Weather identification software

别结果;可视化天气数据,包括风速、雨量、PM_{2.5}含量等气象数据,同时,将产生的数据和各设备的运行状况保存到本地日志文件中;实时展示夜空图像分析仪拍摄的激光雷达台站正上空图片,并将夜空图像保存到本地图像库中。

最后,针对可能出现的各种异常情况,划分重大(I级)和一般(II级)共2类应急响应等级。其中,I级应急响应等级表明激光雷达台站上空出现了突发的恶劣天气,需要值守人员立即启动中高层大气激光雷达智能化运行系统,自动关闭天窗、激光器水冷等设备,防止科研仪器损坏。II级应急响应等级表明未来2小时内可能出现不利于中高层大气激光雷达观测的天气,为了获取优质的实验数据,需要值守人员实时留意室外气象变化。

3.2 天气判别系统的稳定性分析

天气判别系统安装于延庆中高层大气激光雷达台站,系统试运行一年,除遇检查设备、升级设备外,一般都处于工作状态。系统每 2 min 对天气状况是否适宜激光雷达开机观测进行一次判别,值守人员每天的判断次数一般在 5 次以内,对获取的数据进行分析,比较同一时刻系统和值守人员给出的判别结果。图 6 为 2021 年 10 月到 2022 年 3 月延庆台站每月判断情况,其中,不一致的情况为系统判断结果与值守人员判断结果不同,其余情况则记为一致,去除每月设备维护和设备升级的天数外,对天气判别系统判断的准确率进行统计,可以得到系统判别的平均准确率为 97.70%。

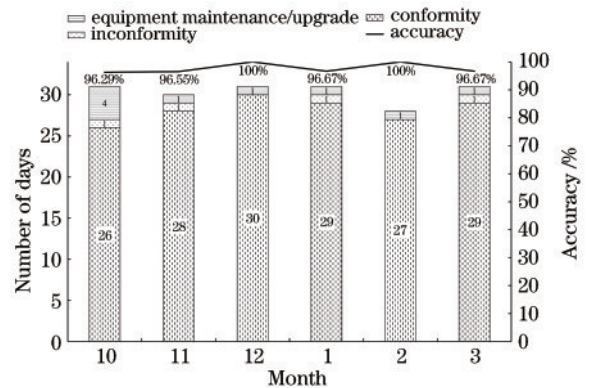


图 6 天气判别系统判断情况

Fig. 6 Judgment situation of weather identification software

对于不一致的情况(共 4 天)进行分析,相比于人工判断,由于天气判别系统具有更高的判断频率,因而可以更有针对性地对实时天气状况进行判别。如 2022 年 1 月 11 日,当天 21:00 时为严重雾霾天气,天气判别系统和值守人员都判断为不能开机,后值守人员不再关注室外天气变化;但当天 23:00 左右天气状况转为轻度雾霾,系统判别结果转为“持续关注”;2022 年 1 月 12 日 00:45 左右天气转为晴朗,适宜中高层大气激光雷达开机观测,此时系统判别结果转为“适宜开机”,更符合实际情况。

综上所述,本系统能够在尽可能保证中高层大气激光雷达安全运行的情况下,以更高的频率判断当前天气状况是否适宜激光雷达开机观测,结合中高层大气激光雷达智能化运行系统,有效地增加了中高层大气激光雷达的观测天数,提高了中高层大气激光雷达的观测效率。未来,可以在不同的中高层大气激光雷达台站试运行该系统,根据系统试运行过程中获取的大量气象数据,对夜空图像分析仪的模型算法、天气类别的划分阈值等进行微调,将本系统推广到更多的激光雷达台站中使用。

4 结 论

针对中高层大气激光雷达观测过程中气象环境的

监测需求,研发了天气判别系统,对当前气象环境是否满足中高层大气激光雷达的观测条件进行实时判别,对未来可能出现的极端天气及时进行预警。天气判别系统可以实时获取云端天气数据;应用串口通信技术,结合本地气象站,准确获取本地天气数据;应用数字图像处理技术,构建夜空图像分析仪,实时获取台站正上空的星星数量。综合以上数据,确保中高层大气激光雷达能够安全运行。本系统经过长时间观测测试,能满足延庆激光雷达台站监测气象环境的需求,为中高层大气激光雷达的安全运行提供技术保障,促进了中高层大气激光雷达的业务化运行。同时,在此基础上可以继续扩大图像数据库,采用机器学习、神经网络训练等方式,增加图像特征与激光雷达最大探测高度的相关性,提高中高层大气激光雷达的观测效率。

致谢 本项成果使用国家重大科技基础设施子午工程延庆台站科学数据。

参 考 文 献

- [1] 焦菁. 基于荧光激光雷达探测的中高层大气金属层结构及其机制研究[D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2015.
Jiao J. Special structures of mid-upper atmospheric metal layers and their formation mechanisms based on fluorescence lidar[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [2] 马聚. 基于激光雷达观测的中间层和低热层大气耦合过程研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
Ma J. The studies of the coupling process within the mesosphere and lower thermosphere region based on lidar observations[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- [3] 陈林祥, 杨国韬, 王继红, 等. 瑞利激光雷达探测北京上空中间层低逆温层[J]. 空间科学学报, 2017, 37(1): 75-81.
Chen L X, Yang G T, Wang J H, et al. Measurements of lower mesosphere inversion layers with Rayleigh lidar over Beijing[J]. Chinese Journal of Space Science, 2017, 37(1): 75-81.
- [4] 熊建刚, 易帆, Klostermeyer J, 等. 中层顶波非线性相互作用的甚高频雷达观测研究[J]. 电波科学学报, 2000, 15(1): 84-89.
Xiong J G, Yi F, Klostermeyer J, et al. The VHF observation and study of nonlinear interaction near mesopause[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2000, 15(1): 84-89.
- [5] 李勇杰, 程学武, 李发泉, 等. 武汉上空钠层与钾层的同时激光雷达观测[J]. 空间科学学报, 2012, 32(1): 68-74.
Li Y J, Cheng X W, Li F Q, et al. Using lidar to simultaneously observe the sodium layer and potassium layer over Wuhan[J]. Chinese Journal of Space Science, 2012, 32(1): 68-74.
- [6] 田玉芳, 吕达仁. 北京 MST 雷达探测中间层-低热层观测结果初步分析[J]. 地球物理学报, 2016, 59(2): 440-452.
Tian Y F, Lü D R. Preliminary analysis of Beijing MST radar observation results in the mesosphere-lower thermosphere[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(2): 440-452.
- [7] 沈法华, 庄鹏, 王邦新, 等. 瑞利-米散射多普勒激光雷达低层风场反演方法研究[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1110005.
Shen F H, Zhuang P, Wang B X, et al. Research on retrieval method of low-altitude wind field for Rayleigh-Mie scattering Doppler lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1110005.
- [8] Sugimoto N, Uno I, Nishikawa M, et al. Record heavy Asian dust in Beijing in 2002: observations and model analysis of recent events[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(12): 1640.
- [9] 余豪. 基于气象水文耦合模型的洪水预报与洪水优化调度方法及应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
Yu H. Research on the method and application of flood forecasting and flood dispatching optimization based on a coupled atmospheric-hydrological[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [10] 陈义伟. 天气学和天气预报的研究进展[J]. 科技资讯, 2013, 11(36): 207.
Chen Y W. Research progress of synoptic science and weather forecast[J]. Science & Technology Information, 2013, 11(36): 207.
- [11] 全国气象发展“十三五”规划[N]. 中国气象报, 2016-11-30(2).
The 13th five-year plan for national meteorological development[N]. China Meteorological News, 2016-11-30(2).
- [12] 程学武, 龚顺生, 李发泉, 等. 采用原子滤光的激光雷达白天探测技术[J]. 中国激光, 2007, 34(3): 406-410.
Cheng X W, Gong S S, Li F Q, et al. Daytime observation technology of lidar by using atomic optical filter[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(3): 406-410.
- [13] 杨国韬, 刘炳模, 王嘉珉, 等. 根据激光雷达观测结果研究中国武汉地区钠层的分布[J]. 地球物理学报, 2003, 46(5): 577-583.
Yang G T, Liu B M, Wang J M, et al. A study of sodium layer distribution over Wuhan, China based the lidar observation result[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(5): 577-583.
- [14] 付松琳, 谢晨波, 李路, 等. 基于激光雷达探测技术的 PM_{2.5} 浓度辨识研究[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0928001.
Fu S L, Xie C B, Li L, et al. PM_{2.5} concentration identification based on lidar detection[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0928001.
- [15] 杨勇, 程学武, 杨国韬, 等. 高层大气探测激光雷达研究进展[J]. 量子电子学报, 2020, 37(5): 566-579.
Yang Y, Cheng X W, Yang G T, et al. Research progress of lidar for upper atmosphere[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2020, 37(5): 566-579.
- [16] 林兆祥, 柯伟, 杨国韬, 等. 一种激光雷达开机自动判别方法、设备及存储设备: CN111832407A[P]. 2020-10-27.

- Lin Z X, Ke W, Yang G T, et al. The invention relates to a lidar startup automatic identification method, a device and a storage device: CN111832407A[P]. 2020-10-27.
- [17] 冯艳茹. 基于 Python 的网络爬虫系统的设计与实现[J]. 电脑与信息技术, 2021, 29(6): 47-50.
- Feng Y R. Design and implementation of web crawler system based on Python[J]. Computer and Information Technology, 2021, 29(6): 47-50.
- [18] 周党生. 大数据背景下数据预处理方法研究[J]. 山东化工, 2020, 49(1): 110-111, 122.
- Zhou D S. Research on data preprocessing method under the background of big data[J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(1): 110-111, 122.
- [19] 詹伟强. 基于形态学分析的激光雷达智能开机系统[D]. 武汉: 中南民族大学, 2019.
- Zhan W Q. Lidar intelligent booting system based on morphological analysis[D]. Wuhan: South-Central University for Nationalities, 2019.
- [20] 邓仕超, 黄寅. 二值图像膨胀腐蚀的快速算法[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(5): 207-211.
- Deng S C, Huang Y. Fast algorithm of dilation and erosion for binary image[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(5): 207-211.
- [21] 戴庞达, 张玉钧, 鲁昌华, 等. 基于双光源图像特征的夜间能见度观测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(1): 1-5.
- Dai P D, Zhang Y J, Lu C H, et al. Research on night visibility estimation method based on image features of dual light sources[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(1): 1-5.