

星载大气探测激光雷达技术与应用

王玉诏^{1,2,3}, 郑永超^{1,2,3}

(1.北京空间机电研究所,北京 100094;2.北京空间技术研究院 激光信息感知核心专业实验室,北京 100094;
3.北京市航空智能遥感装备工程技术研究中心,北京 100094)

摘要: 本文对国内外星载大气探测激光雷达的原理、技术和应用等情况进行了分析和归纳。星载大气探测激光雷达的发展,是科学需求、探测理论、硬件技术、应用能力波浪式推动和迭代的过程,具有弱周期性。在云和气溶胶方面,多波长、高光谱分辨结合偏振的综合探测将为科学研究提供更精细的微观信息,而小型化微脉冲激光雷达则为星座探测提供了技术基础。在大气成分方面,积分路径差分吸收技术将能提供更精确的数据。激光雷达是对其他遥感系统的有效补充,更加注重廓线探测、空间分辨和测量精度,在水平覆盖、探测效率等方面存在天然不足,激光雷达与其他遥感手段结合,才能构建更加科学的观测体系,为科学研究和遥感应用提供更有力的支撑保障。

关键词: 激光雷达; 大气探测; 星载

中图分类号: P 407.5; TN 249; P 414 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.05.019

Technology and Application of Space-Borne Atmospheric Detection Lidar

WANG Yuzhao^{1,2,3}, ZHENG Yongchao^{1,2,3}

(1.Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China; 2.Key Laboratory of Laser Information Perception, Beijing Institute of Space Technology, Beijing 100094, China; 3.Beijing Aviation Intelligent Remote Sensing Equipment Engineering Technology Research Center, Beijing 100094, China)

Abstract: In this paper, the principle, technology, and application of space-borne atmospheric detection lidar in China are analyzed and summarized. The development of space-borne atmospheric detection lidar is a wave-like push and iteration process in terms of scientific requirements, detection theory, hardware technology, and application capability, with weak periodicity. For clouds and aerosols, multi-wavelength, high-spectral resolution, and polarized lidar will provide more detailed microscopic information for scientific research, while miniaturized micro-pulse lidar will provide the technical basis for constellation detection. For atmospheric composition, the integral path differential absorption technology will be able to provide more accurate data. Lidar is an effective supplement to other remote sensing systems. It pays more attention to profile detection, spatial resolution, and measurement accuracy. However, it has natural deficiencies in horizontal coverage and detection efficiency. Only when lidar is combined with other remote sensing methods can a more scientific observation system be constructed and more powerful support for scientific research and remote sensing application be provided with it.

Key words: lidar; atmospheric detection; space-borne

0 引言

人类生活在被大气包裹着的地球上,大气的密度、分布、运动、组分构成、状态变化等对人类的生存、生产活动有重要的影响。近年来,全球干旱、洪

涝、高温、极寒等极端气候现象日益增多,对人类生存环境及经济活动构成了严重威胁^[1-5]。这些极端天候现象的形成机制、演化过程及发展预测是目前亟待解决的科学问题。全球云、气溶胶和大气中分

收稿日期:2019-02-27; 修回日期:2019-06-28

基金项目:国家重点研究生计划“地球观测与导航”重点专项(2018YFB0504404)

作者简介:王玉诏(1984—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为激光遥感。

子多维度、大视域、高分辨的系统性变化规律的连续观测和反演,是提高对极端天气现象认识,并提出相关问题解决路径所依赖数据的重要来源^[6-10]。

国内外已经发展了多种星载遥感设备用于云、气溶胶和大气分子的全球观测^[11-12]。其中,以星载高光谱相机为代表的被动光学遥感器和极化云雷达为代表的无线电雷达主动探测设备,是目前在用的主要观测手段。被动光学遥感器具有大幅宽、高效率、多参数等优势,但这类遥感器受光源、观测几何、背景干扰、光谱分辨等影响,存在夜间观测能力不足、垂直分辨率较低、反演精度难以提高等问题。主动雷达设备具有全天候观测和高垂直分辨的优势,但其由于波长的原因难以用于气溶胶和分子垂直廓线测量。尽管这些手段随着技术进步在不断完善,但因其机理的限制,还难以满足大气观测对全球视域、廓线精细结构、立体三维、高精度定量遥感等要求^[13]。

激光雷达是近年来迅速发展的大气主动遥感技术^[13-14]。激光是主动光源,可以实现全天时大气观测;激光的波长和功率使其具有合适的大气介质穿透性,可以实现径向廓线观测;基于定量的激光发射和接收测量,可以获得更为精确的观测数据;基于卫星平台全球推扫,可以实现对全球大气要素的立体三维观测。这些特点和优势使激光雷达成为当前国内外发展的重要星载设备。

1 星载大气激光雷达原理与探测机制

激光是人造光源,具有相干性好、亮度高、单色性好等特点。通过对光源光谱、偏振、辐射等参数的控制,配合相应探测机制,使其能够长距离穿过大气,并与传输路径上的大气相互作用而获得定量的相关参数,这是激光雷达大气探测的独特优势^[15-17]。采用脉冲激光可以根据回波到达时刻得到不同距离的大气后向散射信号,从而得到大气参数廓线。

激光与大气相互作用可分为米散射、瑞利散射、振动拉曼散射、转动拉曼散射、荧光散射、吸收效应、多普勒效应、退偏振效应等。这些相互作用机制可以应用于大气的云、气溶胶、分子密度、温度、气压、风速等参数的观测。如图 1 所示,激光雷达由激光发射、接收望远镜、中继光学、光电探测、控制与处理等系统组成。

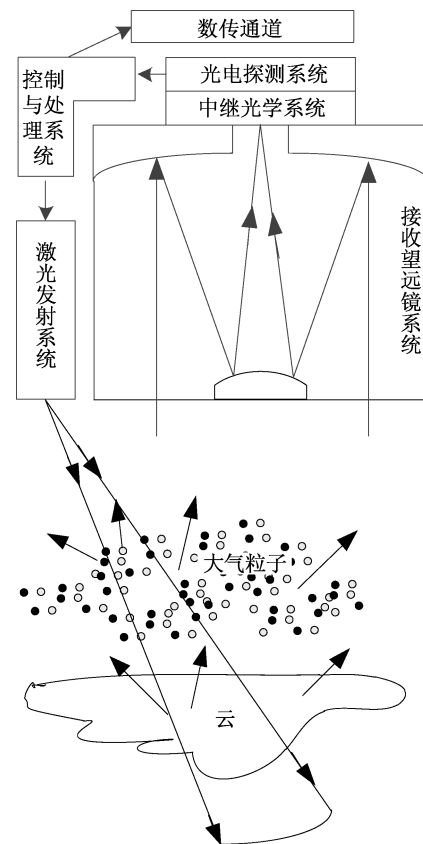


图 1 激光雷达系统组成图

Fig.1 Diagram of lidar system

激光发射系统发射激光脉冲,接收望远镜系统收集目标回波光,中继光学系统分离有效光谱、抑制干扰光谱,光电探测系统将回波光信号转换成电信号,控制与处理系统负责工作时序、状态管控、数据处理和存储。同时,其他位姿测量及辅助数据等与探测数据打包通过数传通道下传给地面接收站,最终由用户或专业人员反演得到各目标参数信息。

基于激光与大气的多种作用机制而研制的大气探测激光雷达设备见表 1^[15-21]。除了高精度廓线、高分辨三维、多参数探测等特点外,星载大气探测激光雷达还可以实现全球覆盖,因此,在大气遥感领域发挥不可或缺的重要作用。

2 星载大气探测激光雷达技术发展

1994 年搭载于美国航天飞机的激光雷达 LITE (Lidar In-Space Technology Experiment) 完成了在轨试验,证明了星载激光雷达对云、气溶胶观测的可行性^[22]。之后,世界各国先后发射了十几套星载大气探测激光雷达系统(见表 2),提出并实施了多个载荷研制和发展计划^[23-28]。

表 1 激光与大气相互作用及其应用

Tab.1 Interaction between laser and atmosphere and its applications

作用过程	介质类型	波长关系	截面/ (cm^2/sr)	探测目标参数	探测高度/ km	适用平台
Rayleigh 散射	分子	$\lambda_r = \lambda_0$	10^{-27}	大气密度、温度、大气消光	0~60	地基、车载、机载、星载
Mie 散射	气溶胶、云	$\lambda_r = \lambda_0$	$10^{-26} \sim 10^{-8}$	气溶胶、烟羽、云等	0~20	地基、车载、机载、星载
振动 Raman 散射	分子	$\lambda_r \neq \lambda_0$	10^{-30}	温度、气溶胶、痕量气体(CO_2 、 SO_2 、 NO_2 、 H_2O)等	0~15	地基、车载、机载
转动 Raman 散射	分子	$\lambda_r \neq \lambda_0$	$10^{-29} \sim 10^{-28}$	温度、气溶胶、云等	0~20	地基、车载、机载
共振荧光散射	原子、分子、离子	$\lambda_r = \lambda_0$	$10^{-23} \sim 10^{-14}$	中层大气密度、风场、温度	70~110	地基、车载
有机分子荧光散射	分子	$\lambda_r \neq \lambda_0$	$10^{-25} \sim 10^{-16}$	有机物(细菌、蛋白质、有机气溶胶等)	0~4	地基、车载、机载
差分吸收	原子、分子	$\lambda_r = \lambda_0$	$10^{-21} \sim 10^{-14}$	痕量气体(CO_2 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 等)	0~20	地基、车载、机载、星载
多普勒效应	原子、分子	$\lambda_r \neq \lambda_0$	—	风速	0~110	地基、车载、机载、星载
退偏振效应	非球形粒子	$\lambda_r = \lambda_0$	—	气溶胶特性、云相态	0~20	地基、车载、机载、星载

表 2 大气环境探测领域国内外星载激光遥感项目

Tab.2 Domestic and overseas space-borne laser remote sensing projects in the field of atmospheric detection

探测领域	任务	国家和地区	时间	观测目标	特征
云和气溶胶	LITE	美国	1994	云和气溶胶	三波长
	MDS-2/ELISE	日本	中止	云和气溶胶	双波长、偏振
	BALKAN-1	俄罗斯	1995	云和气溶胶	单波长
	ALISSA	俄罗斯、法国	1996	云和气溶胶	单波长
	ICESat-1/GLAS	美国	2003	云、气溶胶、冰盖、植被	双波长
	CALIPSO/CALIOP	美国、法国	2006	云和气溶胶	双波长、偏振
	CATS	美国	2015	云和气溶胶	双波长、三波长、偏振、HSRL(High Spectral Resolution Lidar)
	ICESat-2/ATLAS	美国	2018	云、冰盖、植被	单波长
	ADM-Aeolus/ALADIN	欧洲	2018	风、云和气溶胶	单波长
	CM-1	中国	2020	云、气溶胶、植被	双波长、偏振
	EarthCARE/ATLID	欧洲、日本	2021	云和气溶胶	单波长、偏振、HSRL
ACE	美国	2022	云和气溶胶	HSRL、三波长、偏振	
二氧化碳	A-SCOPE	欧洲	中止	二氧化碳	双波长、双脉冲、IPDA(High Spectral Resolution Lidar)
	ASCENDS	美国	2025	二氧化碳、氧气	多波长、多脉冲、频率扫描、IPDA
	ACDL	中国	2021	二氧化碳、云和气溶胶	双波长、双脉冲、IPDA
水汽 ^[46]	WALES	欧洲	中止	水汽	双波长、双脉冲、IPDA
甲烷 ^[47]	MERLIN	法国、德国	2024	甲烷	双波长、双脉冲、IPDA
臭氧 ^[48]	ORACLE	美国	中止	臭氧	双波长、双脉冲、距离分辨

国内外在轨或在研的星载大气探测激光雷达科学目标、载荷参数、试验情况等文献[23-28]中多有详细介绍,本文不再赘述。本文将从云、气溶胶、大气成分3类目标的观测需求、技术途径、载荷特点和可行性条件分别进行讨论。

2.1 云观测激光雷达

云的观测要素主要为云水平分布、云顶高、云

底高、云相态、云粒子尺度等与辐射和降水相关的指标。

星载激光雷达可在卫星飞行过程中通过推扫方式获得云的水平分布参数。通过光束传输路径距离高分辨切片处理,得到大气回波的垂直分布廓线,从中分析出云顶高度,在光学厚度不高的条件下可以获得云底高度^[29-30]。云高只与激光飞行时间有关,且云散射强度仅次于地表反射,所以几乎所有的星载对地观测激光雷达都可以用作云高探测,

如用于地表高程探测的激光测高仪(地球科学激光测高仪系统 GLAS (the Geoscience Laser Altimeter System)^[31-32]、先进地表激光测高系统 ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System)^[33]等。但并不是所有的激光测高仪都配备了云探测功能,如 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 的全球生态系统动力学研究激光雷达 GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation)^[34]、我国的资源卫星激光测高仪^[35]、陆地生态碳监测卫星多波束植被测量激光雷达 CM-1 (Terrestrial Ecosystem Carbon Monitoring Satellite) 等^[36],这是很遗憾的。

云相态观测主要是为区分水云粒子和冰云粒子,通过激光偏振探测可实现云相态的识别^[15-17],如水云退偏比约为 0,卷云退偏比可达 0.5^[37]。这需要对发射激光进行偏振控制,对接收光进行退偏振测量,同时对接收光学系统的保偏、检偏特性也提出了较高的要求,增加了系统的设计、研制和定标负担。在 NASA 的正交偏振云-气溶胶激光雷达 CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) 之前的星载大气探测激光雷达都没有配置该功能,从 CALIOP 开始,新研制的大气探测激光雷达都开始配置这个功能^[38-40]。

理论上,通过激光多波长探测可获得云粒子尺度信息^[41]。在激光波长与粒子尺度相当条件下,不同的粒子尺度对波长的响应不同,通过相应的散射和消光模型,可由多波长回波信号反演粒子的尺度、形状等信息。云粒子平均尺度一般远大于激光波长,因而多波长激光后向散射差异较小,CALIOP 利用这种特性对 1 064 nm 和 532 nm 双通道相对常数进行定标^[42]。也有学者根据多波长透过率的不同对卷云的形状和尺度开展了相应的研究^[43]。多波长激光雷达对云粒子尺度反演的应用可行性和适用性还有待进一步研究,在气溶胶粒子尺度探测方面则比较明确^[16-17]。

2015 年以 NASA “云气溶胶传输系统”CATS (Cloud-Aerosol Transport System) 为代表高重频微脉冲激光雷达发射,并在轨装载于国际空间站^[44-45]。高重频微脉冲激光雷达具有小型化、高效率、低损伤、适装性强等特点,可星座组网探测。但这种体制需要光子级灵敏度的探测器,以及较高的背景抑制比,同时在系统设计和研制中带来波长优选、波

长稳定性、线宽控制、窄带滤波、高动态范围探测及校正等一系列问题,为设备研制增加了一定的难度。

2.2 气溶胶观测激光雷达

气溶胶的观测分为宏观和微观两个方面:宏观方面主要观测水平分布、垂直分布;微观方面考察其种类(如水溶性粒子、沙尘性粒子、海洋性粒子、煤烟、火山灰等)、粒径、粒径分布、浓度等^[46]。

星载激光雷达可获得气溶胶垂直分布廓线,通过卫星推扫获得其水平分布,这与云的宏观测量相似。由于后向散射信号较弱,气溶胶测量需要多次脉冲累积、高激光功率、大口径接收、高探测灵敏度。气溶胶探测通道可进行云探测,云探测通道不一定能用于气溶胶探测。

在微观探测方面,气溶胶种类、粒径、粒径分布、浓度等都是影响其对辐射、降水等作用的重要因素^[6,46]。退偏振探测可有效区分气溶胶某些种类,如一般沙尘粒子退偏比约为 0.3~0.4,人为气溶胶退偏比小于 3%^[37]等。单波长后向散射激光雷达可以通过反演^[47-48]获得一定精度(20%~50%)^[37]的消光系数廓线和光学厚度。用多波长激光雷达可以估算粒子的粒径,进一步修正相关误差。因此,国外发展了采用多波长、偏振技术的 CALIOP、CATS 等激光雷达以满足气候、气象、环保方面的观测需求。

多波长偏振的后向散射激光雷达在反演时需要事先假设气溶胶的激光雷达比、标定点消光或散射参数,这引入了较大的误差(约 20%~50%,极端情况达到 100%^[37])。这些误差给气候预测带来了极大的不确定性。为解决反演误差问题,发展了高光谱分辨激光雷达(High Spectra Resolution Lidar, HSRL)技术,该技术可以直接测量激光雷达比,提高对气溶胶微物理特性的观测精度^[16-17]。

HSRL 技术理论并不复杂,但是单频脉冲激光器、高光谱分辨光学系统及其波长的匹配控制,是制约该类星载激光雷达发展的难点^[16-17,49]。虽然国内外都开展了大量地基试验研究,但是星载方面直到 2015 年才在 CATS 上进行了初步验证^[44],但是该功能很快失效。2018 年上天的 ALADIN (Atmospheric LAsER Doppler INstrument) 在进行风场测量的同时也进行了该技术验证^[50-51]。

在大气探测激光雷达的仿真和数据处理中,一般后向散射系数用 β 表示,消光系数用 α 表示,退偏

振因子用 δ 表示^[52]。迄今为止用作气溶胶观测的星载激光雷达也可以按上述符号分类,见表 3。

表 3 气溶胶探测能力对比

Tab. 3 Comparison of aerosol detection capabilities

探测领域	任务	国家和地区	时间	观测目标	特征
云和气溶胶	LITE	美国	1994	云和气溶胶	$3\beta(\alpha)$
	MDS-2/ELISE	日本	中止	云和气溶胶	$2\beta(\alpha)+1\delta$
	BALKAN-1	俄罗斯	1995	云和气溶胶	$1\beta(\alpha)$
	ALISSA	俄罗斯、法国	1996	云和气溶胶	$1\beta(\alpha)$
	ICESat-1/GLAS	美国	2003	云和气溶胶、冰盖、植被	$2\beta(\alpha)$
	CALIPSO/CALIOP	美国、法国	2006	云和气溶胶	$2\beta(\alpha)+1\delta$
	CATS	美国	2015	云和气溶胶	$2\beta(\alpha)+1\delta, 2\beta+1\alpha+1\delta, 3\beta(\alpha)+1\delta$
	ADM-Aeolus/ALADIN	欧空局	2018	风云和气溶胶	$1\beta+1\alpha+1\delta$
	CM-1	中国	2020	云和气溶胶	$2\beta(\alpha)+1\delta$
	EarthCARE/ATLID	欧洲、日本	2021	云和气溶胶	$1\beta+1\alpha+1\delta$
	ACE	美国	2022	云和气溶胶	$3\beta+2\alpha+2\delta$
	ACDL	中国	2021	二氧化碳、云和气溶胶	$3\beta+2\alpha+1\delta$

在 2015 年之后,星载 HSRL 已逐渐进入实用阶段。理论和实践已经证明,要全面、准确地获得气溶胶的微物理信息,至少需要 $3\beta+2\alpha+1\delta$ 的配置^[52]。这对现有的技术带来极大的挑战,目前公开报道项目中,NASA 的 ACE (Aerosol, Cloud, and ocean Ecosystem) 具备 $3\beta+2\alpha+2\delta$ 的能力^[53-54]。

2.3 大气成分观测激光雷达

星载大气成分观测激光雷达的观测需求是气体分子密度的水平和垂直分布。

气体分子密度的测量一般通过差分吸收实现^[15-17]。针对目标分子,需要选择一个处于分子吸收线内的工作波长 λ_{on} 以及一个吸收极小甚至不吸收的波长 λ_{off} ,这两个波长相差不能太大,以避免因为波长差引起的误差超过观测误差。不考虑波长差的情况下,高度 z 以上的分子数柱密度反演公式可以表示为

$$M(z) = \frac{1}{2\Delta\sigma(z)} \left[\ln C - \ln \frac{P_{on}(\lambda_{on}, z)}{P_{off}(\lambda_{off}, z)} \right] \quad (1)$$

式中: $M(z)$ 为高度 z 上空的大气柱浓度; $\Delta\sigma$ 为高度 z 上空的等效吸收截面; C 为系统定标常数; P 为回波信号。

根据数密度反演公式可以推导出相对误差公式为

$$\delta R(z) = \frac{\sqrt{(1 + e^{4K(z)})}}{2K(z) \cdot R_{SN}(z)_{off}} \quad (2)$$

式中: $\delta R(z)$ 为数密度反演的相对误差; $K=M\Delta\sigma$ 为工作波长 λ_{on} 与参考波长 λ_{off} 在高度 z 上空的吸收光学厚度差; $R_{SN}(z)_{off}$ 为参考波长在高度 z 处回波的信噪比。

在进行差分吸收测量时对工作波长的大气吸收特性、探测信噪比都有一定的要求。以 CO_2 为例,设其含量为 400×10^{-6} ^[55],则对 $(1\sim 4) \times 10^{-6}$ 的测量误差提出的信噪比 R_{SN} 和单程相对吸收透过率 T 需求如图 2 所示。

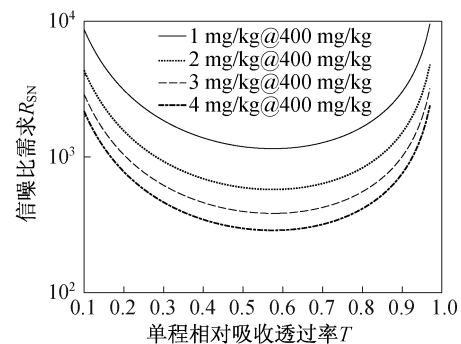


图 2 不同 CO_2 探测精度时单程相对吸收透过率和信噪比需求关系

Fig.2 Relationships between the one-way relative absorption transmittance and the signal-to-noise ratio requirement under different CO_2 detection accuracy

相对吸收透过率过高或过低都不利于分子浓度探测,需要选择合适的工作波长。除满足上述要求外,所选波长也需要排除其他分子的光谱干扰。当前较成熟的激光器可选波长有限,因此需要 OPO (Optical Parametric Oscillator) 等手段实现激光波长输出;为了保证吸收截面的稳定性,对激光发射波长稳定性、线宽等都要提出极高的控制要求;对于天顶角不为 0° 的激光雷达,还需要考虑到卫星相对大气飞行时速度分量引起的多普勒频移补偿。

探测信噪比与激光发射能量、接收口径、散射强度、探测灵敏度、背景光抑制能力等密切相关。激光发射能量的提高会提高激光器的研制难度和复杂度,降低可靠性。差分吸收激光雷达的工作波长往往处于红外波段,该波段大气分子的后向散射能力较差,主要依靠气溶胶、云和地表散射。只有地表的回波可以使系统长期保持较高的探测信噪比和探测精度,因而该类星载激光雷达普遍采用以地表回波探测为主的积分路径差分吸收 IPDA (Integrated Path Differential Absorption) 体制^[56]。

该体制以获得大气整层的柱浓度为主,在气溶胶或云的散射较强的条件下也可以实现廓线探测。

典型星载大气分子探测激光雷达采用双脉冲体制^[16-17],其原理如图 3(a)所示。在微秒量级的时间间隔内激光器分别发射 λ_{on} 和 λ_{off} 脉冲。因为时间极短,可以近似认为两个脉冲由同一地表区域反射,在接收端分别获得两个脉冲的回波信号,进而反演柱浓度。这种方式在实际测量中不但受到激光发射波长稳定性的影响,还受到大气温度廓线、气压廓线、风速等的影响。这些影响制约了该类激光雷达的测量能力和研制进度,目前欧空局采用该体制测量 CO_2 的 A-SCOPE (Advanced Space Carbon and Climate Observation of Planet Earth) 项目处于停滞状态^[57-59], CNES (National Centre for Space Studies) 采用该体制测量 CH_4 的 MERLIN (Methane Remote Sensing Lidar Mission) 项目计划于 2024 年发射^[59-60]。NASA 在 ASCENDS (Active Sensing of CO_2 Emissions during Nights, Days, and Seasons) 中提出波长扫描体制^[61-62],如图 3(b)所示。

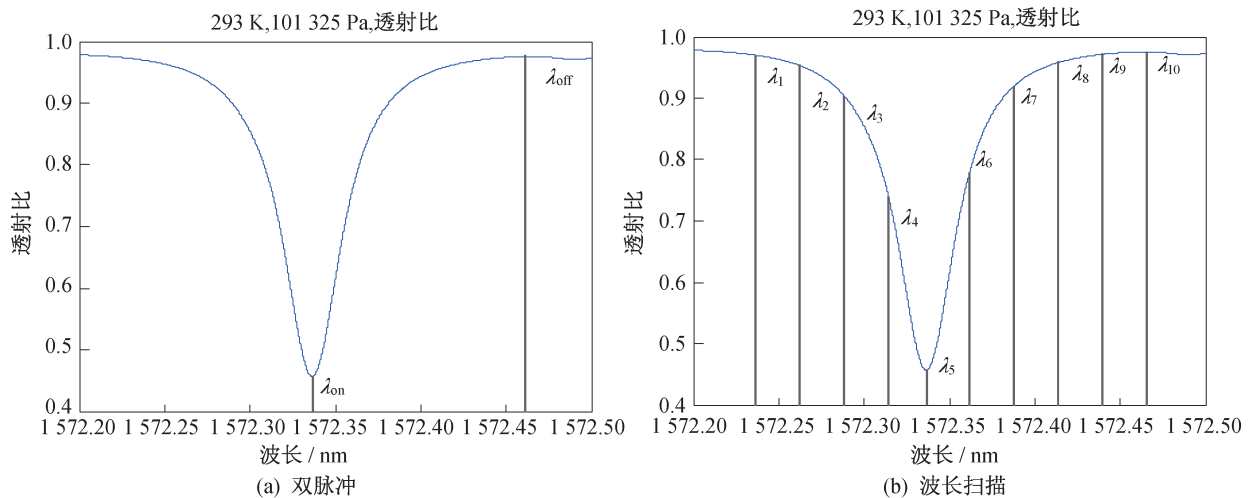


图 3 双脉冲体制和多波长扫描体制示意图(以 CO_2 吸收波长 1572.3365 nm 为例)

Fig.3 Schematic diagram of dual-pulse system and multi-wavelength scanning system (taking CO_2 absorption wavelength 1572.3365 nm as an example)

这种体制的激光雷达在工作时发射的不是一个波长,而是分时发射一组波长,这组波长从吸收光谱的一侧扫描至另一侧,在接收端得到整层大气的吸收光谱离散采样结果。通过拟合手段由离散结果可以得到完整的吸收光谱。该方法对波长稳定性、温度、气压等影响有较好的适应性。ASCENDS 还配置了 O_2 探测通

道,用于校正测量点的气压数据,从而提高反演精度。该系统目前还未进入到工程研制阶段^[60]。该技术要求短时间内完成波长扫描,同时信噪比也要满足一定要求,因此,在激光发射端和高灵敏探测接收端都提出了新的要求、挑战,目前这些问题已得到解决,并持续进行了机载试验验证。

2.4 我国星载大气探测激光雷达

我国近年来加快了星载大气探测激光雷达研制步伐,安排了多个预研和型号项目。但主要还处于跟跑阶段。

型号方面,我国分别安排了陆地生态系统碳监测卫星多波束激光雷达 CM-1 和大气环境参数激光雷达 ACDL (Aerosol and Carbon dioxide Detection Lidar)^[36]。CM-1 通过激光雷达测量全球植被高度、云和气溶胶,为气候研究和林业应用提供全球植被碳储量及云、气溶胶三维分布信息。该激光雷达共有 6 个波束,其中 5 个波束用于植被高度探测,另一个波束用于云和气溶胶探测。CM-1 中云和气溶胶的探测体制、参数和指标主要借鉴 CALIOP,实现 $2\beta(\alpha)+1\delta$ 探测能力。大气环境参数激光雷达 ACDL 用于测量全球 CO_2 柱浓度、云和气溶胶三维分布信息。该激光雷达采用 $1.57\ \mu\text{m}$ 、 $1\ 064\ \text{nm}$ 、 $532\ \text{nm}$ 3 个波长,在 $1.57\ \mu\text{m}$ 波长上采用双脉冲 IPDA 体制测量 CO_2 柱密度,在 $532\ \text{nm}$ 波长使用了 HSRL 技术并实现偏振探测,同时 $1\ 064\ \text{nm}$ 波段实现气溶胶测量,最终形成 $3\beta+2\alpha+1\delta$ 探测能力。这两台激光雷达载荷计划于 2020—2025 年间实现在轨运行。

以 CATS 为蓝本开展了星载小型化激光云高仪研究,该激光雷达通过高重频、微脉冲体制实现云、气溶胶全球三维观测,具体参数指标和实现路径尚在研究当中^[63]。此外,我国近年来也开展了频率梳技术^[64]、光丝技术^[65]等新体制的研究和论证工作。

3 空间大气探测激光雷达发展趋势

星载大气探测激光雷达的发展,是科学需求、探测理论、硬件技术、应用能力波浪式推动和迭代的过程。科学需求牵引了激光雷达探测理论的发展,激光器、探测器等硬件技术的发展,基于观测数据支撑下应用和理论水平提升,促进了需求的进一步发展。4 种要素中每一种的突破都推动着星载大气探测激光雷达的进步,进步的不断累积催生了星载大气探测激光雷达系统的新突破。体现在时间轴上,其发展的弱周期性见表 2 和表 3。

20 世纪 90 年代至 2006 年,多波长偏振后向散射激光雷达迅速发展,该发展期持续了 10 a 以上,但在 HSRL 和 IPDA 所需的单频脉冲激光及高光谱分

辨技术上遇到阻碍,直至 2015 年 HSRL 才开始在轨验证。2018 年 ALADIN 的入轨运行标志着星载 HSRL 正式进入应用阶段,也预示新一轮发展周期的开始。在这轮发展周期中,不但有配置了 HSRL 技术的 ATLID、ACE 等激光雷达,也有以 CO_2 、 CH_4 等为目标的激光雷达出现。CALIOP 发射后 10 a 的技术累积,推进了星载大气探测激光雷达进入新的发展阶段。在云和气溶胶探测方面,CATS、ALADIN 以及近年计划发射的 ATLID、ACE 都配置了 HSRL,ACE 的目标是具备 $3\beta+2\alpha+2\delta$ 的气溶胶观测能力。HSRL 是今后一段时期星载云、气溶胶激光雷达重要发展方向。

云气溶胶探测激光雷达的另一个发展方向是以 CATS 为代表的小型高重频微脉冲激光雷达,其低成本、低资源占用、高可靠、易量产的优势使其成为未来全球云、气溶胶星座化观测的优选设备。星座探测可以提供更多的观测数据,推动多源数据融合反演技术发展,优化提升反演精度和应用价值。

星载大气成分浓度观测激光雷达主要以 IPDA 体制为主,在云、气溶胶富集的部分区域可以实现廓线观测。由于技术和资源的综合制约,近期星载激光雷达实现多种温室气体、污染气体探测还有难度,双脉冲体制和多脉冲波长扫描激光雷达都未进行在轨验证。目前较为明确的是 CO_2 和 CH_4 观测激光雷达将在 2025 年之前在轨探测。

总的来说,云、气溶胶的星载激光雷达未来有两大趋势:1) 具有 $3\beta+2\alpha+2\delta$ 功能的高精度高成本综合性科学观测载荷;2) 具备 $2\beta(\alpha)+1\delta$ 、 $3\beta(\alpha)+1\delta$ 或 $3\beta(\alpha)+2\delta$ 功能的适用于星座建设的小型高重频微脉冲低成本载荷。大气成分探测的星载激光观测近期会以双脉冲 IPDA 和多脉冲波长扫描 IPDA 体制并行为主。

双端激光雷达形式的激光掩星大气廓线的探测是近年来新的热点,这种体制的积分路径比垂直方式增加了两个数量级,在痕量气体观测方面极具优势。欧洲科学家已开展了十几年的研究^[66-67],我国也开展了该类探测方式的研究并取得了阶段性成果^[68]。

频率梳技术、光丝技术等新技术、新理论、新体制的出现也为未来的星载大气探测激光雷达发展提供了更多的可选途径,拓展了探测能力和应用范围。

4 启示与建议

从国内外星载激光大气探测雷达的发展,得到启示和建议如下:

1) 激光雷达在全球大气探测中展示了高时空分辨、高精度探测、多参数测量、连续廓线数据等独特的优势,已成为大气观测的重要的、不可替代的手段。

2) 大气探测激光雷达基于主要科学和工程目标而研制,探测体制和技术呈多样性发展,各有所长,没有那种体制占明显优势,方案选取依需而定。

3) 星载大气探测激光雷达发展呈弱周期性规律,这是由于理论研究、科学需求、器件和技术发展、载荷能力在轨验证、工程应用、技术提升与优化等多环节轮动所致。

4) 我国应加强技术基础和应用能力建设,加大关键技术、核心器件的研发投入和支持力度,强化科学目标牵引、载荷技术支持、卫星配套服务的论证和研制体系,以应对更新、更高的观测需求。

5) 激光雷达是跨领域多学科交叉的应用系统,科学目标与工程实现之间要相互协调、互为支撑,在顶层设计统筹下有计划分阶段的设立并实现目标。

6) 激光雷达是对其他遥感系统的有效补充,更加注重廓线探测、空间分辨和测量精度,在水平覆盖、探测效率等方面存在天然不足,激光雷达与其他遥感手段结合,才能构建更加科学的观测体系,为科学研究和遥感应用提供更有力的支撑保障。

参考文献

[1] 侯燕捷. 近 15 年来气候变化对中国经济的直接影响[J]. 吉林林业科技, 2015, 44(1): 48-54.

[2] 李抒盈. 气候变化对国内生产总值的影响及其适应政策研究[D]. 北京: 对外经济贸易大学, 2016.

[3] 王桂芝, 顾赛菊, 陈继波. 基于投入产出模型的北京市雾霾间接经济损失评估[J]. 环境工程, 2016, 34(1): 17-19.

[4] 符传博, 丹利. 1960—2013 年华南地区霾污染的时空变化及其与关键气候因子的关系[J]. 中国环境科学, 2016, 36(5): 25-27.

[5] 任福民, 高辉, 刘绿柳, 等. 极端天气气候事件监测与预测研究进展及其应用综述[J]. 气象, 2014, 40(7): 860-874.

[6] 李占清. 云、气溶胶气候效应的观测与模拟研究综述[C]//第一届中国大地测量和地球物理学学术大会. 北京: 中国测绘学会, 2014: 1-2.

[7] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 1-5.

[8] 石睿, 王体健, 李树, 等. 东亚夏季气溶胶-云-降水分布特征及其相互影响的资料分析[J]. 大气科学, 2015, 39(1): 12-22.

[9] LI Z Q, NIU F, FAN J, et al. Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation [J]. Nature Geoscience, 2011, 4(12): 888-894.

[10] 杜昊鹏, 缪启龙. 温室气体对气候环境的影响预测及其不确定性[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(2): 72-74.

[11] 郭倩蕊, 赵晨光, 张强. 大气环境监测卫星有效载荷发展综述[C]//第 19 届中国遥感大会. 西安: 中国宇航学会, 2014: 215-221.

[12] 卢乃锰, 谷松岩. 气象卫星发展回顾与展望[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 832-841.

[13] 卢乃锰, 闵敏, 董立新, 等. 星载大气探测激光雷达发展与展望[J]. 遥感学报, 2016, 20(1): 1-9.

[14] 高军, 戴永江, 王丽霞. 星载主动光学遥感技术现状[J]. 航天返回与遥感, 2000, 21(2): 14-22.

[15] 孙景群. 激光大气探测[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 27.

[16] WEITKAMP C. Lidar range-resolved optical remote sensing of the atmosphere [M]. New York: Springer, 2005: 105-141.

[17] TAKASHI F, TETSUO F. Laser remote sensing [M]. Boca Raton: CRC Press, 2005: 1-36.

[18] 华灯鑫, 宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(增刊1): 21-27.

[19] 黄朝围, 何赟晟, 孙凯鹏, 等. 星载线阵 CCD 相机与激光测高仪无控定位精度对比分析[J]. 上海航天, 2018, 35(5): 89-96.

[20] 田晓敏, 刘东, 徐继伟, 等. 大气探测激光雷达技术综述[J]. 大气与环境光学学报, 2018, 13(5): 321-341.

[21] 洪光烈, 章桦萍, 刘豪, 等. 国外差分吸收激光雷达探测大气 CO₂ 研究综述[J]. 光电工程, 2018, 45(1): 1-14.

[22] WINKER D A, COUCH R H, MCCORMICK M P. An overview of LITE: NASA's lidar in-space technology experiment [J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(1): 164-180.

[23] 郑永超, 王玉诏, 岳春宇. 天基大气环境观测激光雷达技术和应用发展研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 1-14.

- [24] 田晓敏,刘东,徐继伟,等.大气探测激光雷达网络和星载激光雷达技术综述[J].大气与环境光学学报,2018,13(6):401-416.
- [25] 刘刚,史伟哲,尤睿.美国云和气溶胶星载激光雷达综述[J].航天器工程,2008,17(1):78-84.
- [26] 许春晓,周峰.星载激光遥感技术的发展及应用[J].航天返回与遥感,2009,30(4):26-31.
- [27] 朱孟真,程勇,谭朝勇,等.国外空间激光的发展现状[J].红外与激光工程,2012,41(12):3241-3247.
- [28] 郭商勇,胡雄,闫召爱,等.国外星载激光雷达研究进展[J].激光技术,2016,40(5):772-778.
- [29] 李子晨,郝明磊,管宇暄.激光雷达云底识别算法综述[J].气象水文海洋仪器,2016,33(4):73-79.
- [30] ZHAO C F, WANG Y Z, WANG Q Q, et al. A new cloud and aerosol layer detection method based on micropulse lidar measurements [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(11): 6788-6802.
- [31] ZWALLYA H J, SCHUTZ B, ABDALATIC W, et al. ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean and land [J]. Journal of Geodynamics, 2002, 34(3): 405-445.
- [32] ABSHIRE J B, SUNX L, RIRIS H, et al. Geoscience laser altimeter system (GLAS) on the ICESat mission: pre-launch and on-orbit measurement performance [C]// 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2003: 1-6.
- [33] DOUGLAS D, MCLENNAN I. Clouds and land elevation (ICESat-2) mission [C]// Proceedings of SPIE. Bellingham, USA: SPIE Press Room, 2010: 1-8.
- [34] ERICH A F, FURQAN L C, ROBERT S, et al. Component-level selection and qualification for the Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) laser altimeter transmitter [C]// Proceedings of SPIE. Bellingham, USA: SPIE Press Room, 2018: 1-10.
- [35] 唐新明,王鸿燕,祝小勇.资源三号卫星测绘技术与应用[J].测绘学报,2017,46(10):1482-1491.
- [36] 唐新明,李国元.激光测高卫星的发展与展望[J].国际太空,2017(11):13-16.
- [37] ANSMANN A, MULLERD, WANDINGER U, et al. Lidar profiling of aerosol optical and microphysical properties from space: overview, review and outlook [C]// The 1st International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment. Bellingham, USA: SPIE Press Room, 2013: 2-9.
- [38] DAVID M W, JACQUES P, MCCORMICK M P. The CALIPSO mission: space borne lidar for observation of aerosols and clouds [J]. Proceedings of the SPIE, 2003, 4893: 1-12.
- [39] POOLE L R, WINKER D M, PELON J R, et al. CALIPSO: global aerosol and cloud observations from Lidar and passive instruments [J]. Proceedings of the SPIE, 2003, 4881: 481-488.
- [40] LIU D, WANG Z E, LIU Z Y, et al. A height resolved global view of dust aerosols from the first year CALIPSO lidar measurements [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113: 1-15.
- [41] 饶瑞中.现代大气光学[M].北京:科学出版社,2012: 219-275.
- [42] WINKER D M, HOSTETLER C A, VAUGHAN M A, et al. CALIOP algorithm theoretical basis document-part 1: CALIOP instrument, and algorithms overview [R]. 2006: 1-12.
- [43] 陶宗明,刘东,魏合理,等.三波长激光雷达拟合卷云的粒子形状[J].光谱学与光谱分析,2013,33(7):1739-1743.
- [44] MCGILL M J, YORKS J E, SCOTT V S, et al. The cloud-Aerosol transport system (CATS): a technology demonstration on the international space station [C]// Proceedings of SPIE. Bellingham, USA: SPIE Press Room, 2015: 11-16.
- [45] YORKS J E, MCGILL M J, HLAVKA D L, et al. New capabilities for space-based cloud and aerosols measurements: the cloud-aerosol transport system (CATS) [R]. 2014, A43D-0302: 1-6.
- [46] 陈良富,李莘莘,陶金花,等.气溶胶遥感定量反演研究与应用[M].北京:科学出版社,2010:1-16.
- [47] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comment [J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 652-653.
- [48] KLETT J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 212-220.
- [49] 刘东,杨甬英,周雨迪,等.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): 2535-2545.
- [50] ANSMANN A, WANDINGER U, RILLE O L, et al. Particle backscatter and extinction profiling with the space borne high-spectral-resolution Doppler lidar ALADIN: methodology and simulations [J]. Applied

- Optics, 2007, 46(26): 6606-6622.
- [51] COSENTINO A, D'OTTAVI A, SAPIA A, et al. Spaceborne lasers development for ALADIN and ATLID instruments [C]// 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 5673-5676.
- [52] PEREZ R D, WHITEMAN D N, VESELOVSKII I, et al. Effects of systematic and random errors on the retrieval of particle microphysical properties from multi-wavelength lidar measurements using inversion with regularization [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 6(11): 3039-3054.
- [53] DAVID S. NASA's Aerosol-Cloud-Ecosystems (ACE) mission [C]// Hyperspectral Imaging and Sounding of the Environment. Toronto, Canada: OSA Technical Digest, 2011: 1-3.
- [54] CHUANG T, BURNS P, WALTERS E B, et al. Space-borne, multi-wavelength solid-state lasers for NASA's cloud aerosol transport system for international space station [C]// Proceedings of SPIE. Bellingham, USA: SPIE Press Room, 2013: 1-14.
- [55] 赵明伟, 李晨晨, 张兴赢, 等. 基于 SCIAMACHY 反演数据的全球 CO₂ 浓度时空变化特征研究 [J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(2): 95-102.
- [56] EHRET G, KIEMLE C, WIRTH M, et al. Spaceborne remote sensing of CO₂, CH₄, and N₂O by integrated path differential absorption lidar: a sensitivity analysis [J]. Applied Physics B, 2008, 90: 593-608.
- [57] CARON J, DURAND Y, BEZY J L, et al. Performance modeling for A-SCOPE, a space borne lidar measuring atmospheric CO₂ [C]// Proceedings of SPIE. Bellingham, USA: SPIE Press Room, 2009: 1-5.
- [58] CARON J, DURAND Y. Operating wavelengths optimization for a space borne lidar measuring atmospheric CO₂ [J]. Applied Optics, 2009, 48: 5413-5422.
- [59] STEPHAN C, ALPERSM, MILLET B, et al. MERLIN: a space-based methane monitor [C]// Proceedings of SPIE. Bellingham, USA: SPIE Press Room, 2011: 1-15.
- [60] CAMPBELL J F, LIN B, NEHRIR A R, et al. Advanced intensity-modulation continuous-wave lidar techniques for ASCENDS CO₂ column measurements [C]// Proceedings of SPIE. Bellingham, USA: SPIE Press Room, 2015: 1-14.
- [61] ABSHIRE J B, HARIS R, ALLAN G R. A lidar approach to measure CO₂ concentrations from space for the ASCENDS mission [C]// Proceedings of SPIE. Bellingham, USA: SPIE Press Room, 2010: 1-13.
- [62] 徐赤东, 徐青山, 纪玉峰, 等. 小型化高重频大气气溶胶探测星载激光雷达 [C]// 中国现代小卫星技术发展研究. 北京: 中国宇航协会, 2015: 366-371.
- [63] 杨宏雷, 尉昊赞, 李岩, 等. 飞秒光学频率梳高精度气体吸收光谱技术进展 [J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(2): 336-338.
- [64] 岳帅英, 林晨, 高军毅. 白光激光雷达的发展与应用 [J]. 大气与环境光学学报, 2010, 5(1): 1-12.
- [65] HARRISON J J, BERNATH P F, KIRCHENGAST G. Spectroscopic requirements for ACCURATE, a microwave and infrared-laser occultation satellite mission [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2011, 112: 2347-2354.
- [66] SCHWEITZER S, KIRCHENGAST G, PROSCHEK V. Atmospheric influences on infrared-laser signals used for occultation measurements between low earth orbit satellites [J]. Atmospheric Measurement Techniques Discussions, 2011, 4: 2689-2747.
- [67] 王玉诏. 基于 matlab 的激光掩星大气探测仿真系统 [C]// 第三十一届全国空间探测学术研讨会. 银川: 中国空间科学学会, 2018, 47-55.
- [68] 吴小成, 王赤, 付利平, 等. 大气金属层探测研究卫星 [C]// 第二届高分辨率对地观测学术年会. 北京: 中国宇航学会, 2013, 1-6.