

## 天基大气环境观测激光雷达技术和应用发展研究

郑永超<sup>1,2</sup>, 王玉诏<sup>1,2</sup>, 岳春宇<sup>1</sup>

(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)

**摘要:** 根据大气观测目标, 从云-气溶胶、风场和大气分子三个主要方向对天基激光雷达在大气环境观测领域的应用、配置和相关技术发展进行了分析, 研究了天基大气环境探测激光雷达的探测机制、技术体制、系统配置、应用现状、适用范围、约束条件等, 提出天基大气环境观测激光雷达载荷研制应根据任务应用需求、科学和工程目标、各技术体制特点和器件及处理技术特点合理制定指标体系, 充分发挥激光技术长项, 与其他载荷手段优化配置, 技术研究方面应扬长补短, 并在此基础上展望了天基大气环境观测技术和应用的发展趋势、研究热点及其应用拓展。

**关键词:** 激光雷达; 大气; 海洋; 环境

**中图分类号:** P236 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0302002

## Technical and application development study of space-borne atmospheric environment observation lidar

Zheng Yongchao<sup>1,2</sup>, Wang Yuzhao<sup>1,2</sup>, Yue Chunyu<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;

2. Key Laboratory of Laser Information Perception, Beijing Institute of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The applications, configure and technique developments of three main atmospheric environment observation targets (cloud-aerosol, wind field, and atmospheric molecule) were analyzed, and the characteristics and development trend of space-borne atmospheric environment observation lidar were summarized, based on the study of detection principle, technical system, system configure, application state, application scope and constraint condition, etc. Space-borne atmospheric environment observation lidar payloads should be designed according to scientific mission, application requirements and technical characteristics, using the advantages of space-borne lidar, and on the basis, the development trend and research focus of space-borne atmospheric environment observation technology and application were prospected.

**Key words:** lidar; atmospheric; sea; environment

收稿日期: 2017-10-05; 修订日期: 2017-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(41401411, 41401410); 国家重点研发计划地球观测与导航重点专项基金(2016YFB0500802)

作者简介: 郑永超(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电系统、激光遥感总体技术方面的研究。Email: laser0371@163.com

## 0 引言

近年来全球气候变化对气候、气象等领域的影响日益突出,成为制约我国经济可持续发展的重要因素<sup>[1-5]</sup>。与此同时,伴随着经济快速发展而来的大气污染问题日趋严重。全球大气和海洋环境的长期连续观测是全球变化研究的重要途径,也是大气环境治理的重要基础,对气候、气象、环境等的研究和预报具有重要价值,在经济、社会、军事、科学等领域具有重要意义<sup>[1-9]</sup>。

激光雷达是正在蓬勃兴起的主动遥感探测设备,是无线电雷达向光学频段的延伸,也因其工作在光学波段而具有了鲜明的特征<sup>[10-11]</sup>。激光雷达利用光子在大气介质传输中的弹性散射、拉曼散射、荧光散射、多普勒频移等机制实现对大气要素和矢量风场的探测,具有高时空分辨率、高探测精度等特点。利用激光的穿透性和光谱特性,可以实现能见度、云参数、海面风速、叶绿素等海洋环境要素的高精度探测。天基激光雷达在大视角、大尺度之外,还具有高分辨率(径向)、高精度以及抗干扰的独特优势,使得天基激光雷达成为大气和海洋环境观测不可或缺的探测手段。

地基或机载激光雷达系统已经实现了对气溶胶、云、温度、水汽、风场、温室气体(除水汽外的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 等)和污染气体(如 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>)等多参数的高精度连续探测<sup>[10-11]</sup>,受限于地面、布站、光照、观测弧

段等限制,还不能提供全球的连续时空观测信息。天基激光雷达系统具有大范围、大视角、高精度、高时空分辨率、高时空连续性、全天候廓线观测等优势。以美国 20 世纪 90 年代激光雷达空间技术试验(Lidar In-space Technology Experiment, LITE)成功为标志<sup>[10-13]</sup>,天基对地探测激光雷达取得迅猛发展,已经成为当前空间载荷发展的重要和热点方向。

文中对当前天基大气环境观测激光雷达的主要体制、技术、系统参数进行了介绍和分析。从工作机制、发射光源、接收系统、分光系统和探测性能方面对各系统的设计理念及特点进行对比,分析了当前天基激光雷达系统发展规律及国内外发展的差距和原因。提出了我国发展空间环境探测激光雷达的技术方向和发展建议。

## 1 天基环境观测激光雷达发展

在对地观测方面,激光雷达最适合用于对大气环境的探测与研究,可探测多种大气要素,尤其在径向穿透、分层廓线探测方面,具有其他探测手段所不能比拟的优势。激光雷达大气环境探测是国外激光遥感技术发展最早、应用最为广泛的领域,包括对气溶胶和云层、全球对流层风场以及大气二氧化碳进行探测和研究等。空间激光雷达被认为是能够精确观测全球风场、气溶胶、云的垂直物理和化学性质的唯一设备。表 1 列出了主要的大气环境探测领域国

表 1 大气环境探测领域国外星载激光雷达项目

Tab.1 Foreign space-borne lidar projects in the field of atmospheric environmental detection

Detection area	Mission	Country	Time	Observing object	Characteristic
Cloud and aerosol	LITE	USA	1994	Cloud and aerosol	Three-wavelength
	MDS-2/ELISE	Japan	Stopped	Cloud and aerosol	Dual-wavelength, polarization
	BALKAN-1	Russia	1995	Cloud and aerosol	Single-wavelength
	ALISSA	Russia and France	1996	Cloud and aerosol	Single-wavelength
	GLAS	USA	2003	Cloud and aerosol, icecap, plants	Dual-wavelength
	CALIPSO/CALIOP	USA and France	2006	Cloud and aerosol	Dual-wavelength, polarization
	CATS	USA	2015	Cloud and aerosol	High Spectral Resolution Lidar (HSRL), Three-wavelength, polarization
Wind field	EarthCARE/ATLID	Europe and Japan	2018	Cloud and aerosol	Single-wavelength, polarization, HSRL
	ACE/	USA	2020-2025 delayed	Cloud and aerosol, sea biogeocenose	HSRL, Three-wavelength, polarization
	ADM-Aeolus/ALADIN	Europe	2018	Wind field	Direct detection
	JEM-CDL	Japan	Stopped	Wind field	Coherent detection
Carbon dioxide	3D-Winds/HDWL	USA	2016-2020 delayed	Wind field	Direct detection+Coherent detection
	A-SCOPE	Europe	Stopped	Carbon dioxide	Dual-wavelength, dipulse, IPDA
	ASCENDS	USA	2013-2016 delayed	Carbon dioxide	Multi-wavelength, multi-pulse, frequency sweeping, IPDA

外激光雷达项目。

### 1.1 气溶胶、云探测激光雷达

天基对地观测激光雷达的一项重要应用就是对陆地和海洋大气气溶胶-云垂直分布进行长期连续观测。气溶胶粒径一般在纳米至微米级量级,对长波长的散射信号极弱,通常只能用光学手段进行探测。采用多光谱、多角度偏振等被动光学技术可以得到整层气溶胶的光学厚度、粒径分布等特性。光学手段可以高效地获得云的水平分布和运动,通过多光谱、多角度偏振等技术可获得云顶部的粒径分布等特性,通过辐射亮温间接获得云顶高度特性。因此,被动光学成为天基对地观测的主要力量并得到广泛应用。但被动光学探测无法给出气溶胶垂直结构,因下垫面光学干扰难以保证有效反演精度,对云高的探测存在较大不确定性,也难以获得云的垂直结构。而垂直结构探测正是天基激光雷达的突出优势。一般而言,被动光学技术横向探测为主,具有大幅宽、高观测效率、多参数观测等优点,激光雷达则弥补了被动光学观测的不足,发挥纵向探测优势,两者结合,形成对大气环境等目标的多层次立体观测,提高了观测测量精度、作业效率、产品质量。

激光与大气气溶胶之间相互作用的发射与接收波长相近,且不存在能量转移和交换时,被称为弹性散射。弹性散射的微分后向散射截面在各种散射中较大,尤其是气溶胶粒子的米散射在所有散射机制中强度最大,因而这种机制最先用于激光大气探测过程当中。1994年美国NASA研制了以航天飞机为平台的国际上第一台天基大气探测激光雷达——LITE系统<sup>[10-13]</sup>。其后,俄罗斯发展了BALKAN(1995)和ALISSA(1996)云、气溶胶探测激光雷达<sup>[14]</sup>。2003年和2006年美国先后发射了地球科学激光测高仪系统(Geoscience Laser Altimeter System, GLAS)<sup>[15-16]</sup>和云-气溶胶激光雷达和红外探测者卫星观测(The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations, CALIPSO)系统用于全球云、气溶胶廓线探测<sup>[17-18]</sup>。与2010年以前的后向散射激光雷达相比,ESA研制的EarthCare卫星(拟2018年发射)上搭载的大气激光雷达(ATmospheric LIDar, ATLID)<sup>[19]</sup>与NASA正在开展的气溶胶-云-生态系统(Aerosol-Cloud-Ecosystems, ACE)计划<sup>[20]</sup>(拟2025年发射)将要研制的都属于更先进的高光谱分辨激光

雷达(High Spectral Resolution Lidar, HSRL)系统<sup>[10-11]</sup>,这种技术可以极大地提高云和气溶胶的探测精度。目前,HSRL技术已在国际空间站2015年搭载的云-气溶胶传输系统(Cloud-Aerosol Transport System, CATS)<sup>[21]</sup>激光雷达系统上开展在轨验证。

下面就典型的天基激光雷达载荷技术进行分析。

#### 1.1.1 激光雷达空间技术试验

1994年9月9日至20日,发现号航天飞机搭载世界上第一台天基大气探测激光雷达系统LITE进行了为期10d的观测,获得了长达53h、地面轨迹约 $140 \times 10^4$  km、10 s分辨率、40 GB的三波长连续观测数据。10d的连续运行,LITE实现了对云、风暴、对流层和平流层、气溶胶、烟尘、沙尘、地表和海面光学特性的观测。图1为安装在航天飞机上的LITE系统装置简图。图2为LITE途经撒哈沙漠时观测到的

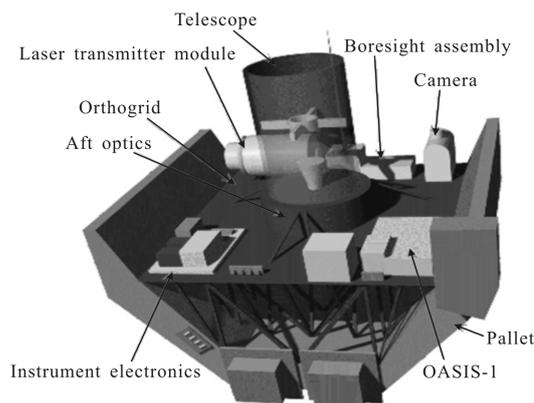


图 1 LITE 激光雷达装置简图

Fig.1 Schematic of LITE lidar

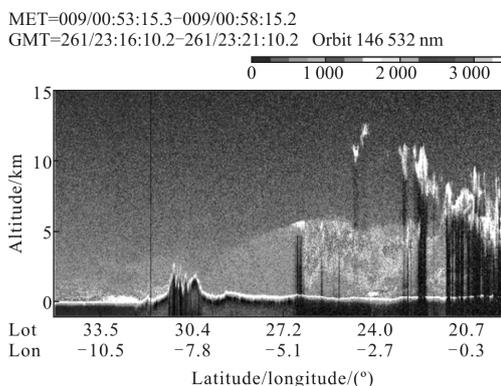


图 2 LITE 云气溶胶数据

Fig.2 LITE cloud and aerosol data

Atlas 山脉(31 N, 8 W),将大气分为较干净(>32 N)和光学厚度较大(<29 N)的两部分,在沙漠内部气溶胶

层高达 5 km, 在低于 23 N 的区域气溶胶被厚云遮挡。图 3 为 LITE 激光雷达组成框图。LITE 的试验不

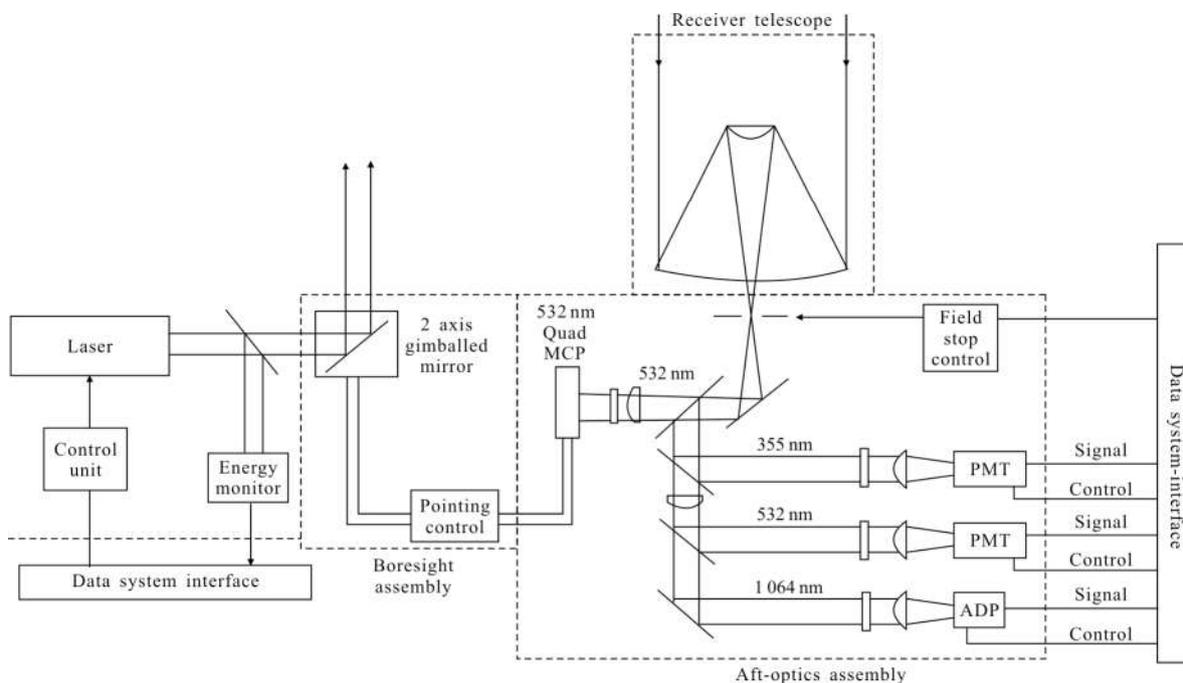


图 3 LITE 系统组成框图

Fig.3 Block diagram of LITE system composition

但获取了大量天基对地主动观测数据, 更为此后天基激光雷达的发展提供了有力的技术和信心支持。

LITE 激光雷达采用脉冲直接探测体制, 飞行高度 260 km, 主要参数为: 灯泵固体 Nd:YAG 脉冲激光器, 输出波长 355、532、1 064 nm, 各波长单脉冲能量分别为 160、500、500 mJ, 光束发散角为 1 mrad; 接收光学系统为直径 1 m 的 Cassegrain 望远镜, 532 nm 和 355 nm 波段为光电倍增管(PMT)探测器, 1 064 nm 波段探测器为雪崩光电二极管(APD); 激光雷达的空间垂直分辨率为 35 m, 水平分辨率为 740 m。

#### 1.1.2 地球科学激光测高仪

2003 年 1 月美国发射了世界上首颗激光测高试验卫星 ICESat, 星上装载了世界上第一个用于全球连续观测的星载激光测高系统——地球科学激光测高仪 GLAS(图 4), 主要用于全球极地冰盖、大气气溶胶和云层垂直分布的探测。GLAS 的主要任务是监测南极洲和格陵兰冰盖的高程变化, 同也可以获得全球云、气溶胶垂直分布数据。

GLAS 运行于 600 km 轨道, 发射系统包括 3 台互为备份的二极管泵浦固体激光器(DPL), 发射波长

为 1 064 nm, 脉冲重频为 40 Hz, 该波长主要用于高程测量, 同时也兼顾云和气溶胶探测。3 台激光器每台设计连续工作 18 个月, 从而共同完成 5 年的连续观测。倍频输出 532 nm 的激光可实现大气气溶胶的探测。在接收系统中, 接收望远镜采用大口径(1 m)卡塞格林型望远镜, 1 064 nm 回波采用模拟信号采集方式, 532 nm 的回波采用光子计数采集方式。

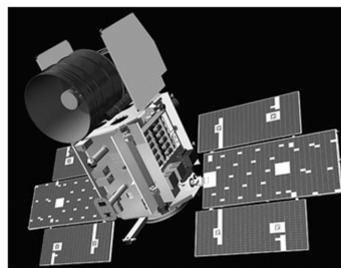


图 4 GLAS 模型图

Fig.4 GLAS model

GLAS 没有使用 355 nm 波长, 主要原因是当时三倍频技术的在轨长期可靠性还未得到验证, 并且载荷的主要任务是高精度测高数据获取。GLAS 激光发散角和接收视场都在 100 μrad 量级, 与 mrad 量

级的 LITE 系统相比,背景光抑制能力大幅提高。探测方面 1 064 nm 依然采用了 APD 探测器,但其探测灵敏度和电子学带宽都因为测高需求与 LITE 有较大差异。而 532 nm 的探测则是试验性的采用了 8 通道的 GAPD 单光子探测器,而未使用 PMT 探测器。

图 5 给出了 GLAS 一组 532 nm 通道的探测数据,图中显示的主要内容主要为:云、气溶胶、地表高度。该数据给出了云、气溶胶的结构分布信号,可以用于水汽输送、气溶胶传输的研究,也可以用于地表变化及其光学特性的研究。

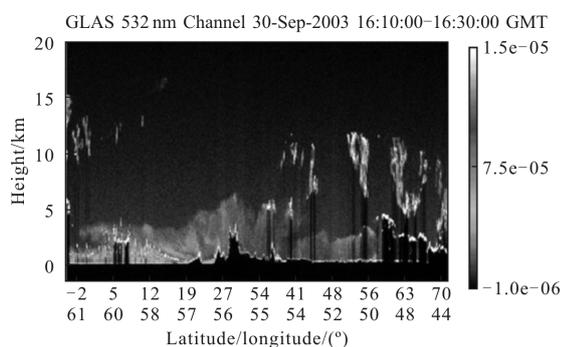


图 5 GLAS 云气溶胶数据

Fig.5 GLAS cloud aerosol data

GLAS 系统在轨运行中,两台激光器相继损坏无法工作,因而观测计划被调整。一系列验证试验表明,经过充分的数据校正之后,GLAS 系统的测量精度满足了科学研究的要求。2009 年 10 月,GLAS 系统的最后一台激光器停止工作,系统停止数据采集,实际在轨正常工作时间为 5 年 6 个月。

GLAS 的首要目的是采用大光斑、全波形、飞行时间技术实现极地冰盖的高程测量。由于星载激光测高仪轨道、功率和能量等问题,能获取的激光测高数据是采样间隔很大且平面精度较低的大光斑回波波形数据。相对于较高的测绘高程测量精度要求,目前 GLAS 等星载激光测高仪的平面定位精度仅为十几米到几十米,在测图方面,不能直接高精度定位,且每个单独的光斑回波数据也不能直接与地形实现空间配准,限制了星载激光遥感的应用。目前星载大光斑激光数据还局限在极地冰盖、海洋、植被等空间范围较大且空间分辨率较低的宏观性遥感应用领域内。

在测绘领域,GLAS 激光测高数据通过由大量回波观测数据生成的粗格网低分辨率数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)与已有的高精度 DSM

配准,来实现几何校正,为高精度测绘卫星的无控制点设计提供了技术借鉴。在海洋领域,GLAS 成功实现了对极地地区冰盖的监测,测高精度达到了 5 cm,并实现冰盖 2 cm 精度年际变化的测量,为海洋和气候研究等领域作出了巨大的贡献。由于 0.15 m 垂直分辨率的全波形采集特点,GLAS 数据被大量应用于植被高度测量,为林业全球观测提供了典型的应用示范,带动了后续全球林业观测激光雷达系统发展。在大气探测领域,GLAS 提供了陆地和海洋上空的大量双波长云、气溶胶廓线观测数据,为后续卫星的数据处理和仿真研究提供了试验基础。

### 1.1.3 正交偏振云-气溶胶激光雷达

继 LITE 和 GLAS 以后,美国 NASA 于 1998 年与法国国家航天中心(CNES)合作研制“云-气溶胶激光雷达和红外探测者卫星观测”(CALIPSO),CALIPSO 卫星于 2006 年 4 月 28 日发射。该卫星上搭载了“正交偏振云-气溶胶激光雷达”(CALIOP),通过对极地平流层的云和气溶胶进行观测,高分辨率地测量云和气溶胶的后向散射强度和垂直分布信息,研究云和气溶胶对全球大气变化的影响。

CALIOP 采用 1 064 nm 和 532 nm 双波长探测,同时引入了偏振探测技术。CALIPSO 卫星填补了星载大气探测激光雷达的空白,实现了(1)全球大气气溶胶和云垂直分布的测量,(2)对云上和极地地区的大气气溶胶的测量,(3)为双波长和偏振通道提供了大气气溶胶和云粒子大小和形状的反演结果。获得了关于火山爆发、全球气候变化、气溶胶变化、云层对气候变化的影响、全球气溶胶水平及垂直尺度分布、沙尘暴全球运行轨迹、污染物的全球扩散影响等诸多问题的研究进展。采用偏振探测技术,CALIOP 具备识别气溶胶、沙尘、烟尘以及卷云的能力。CALIPSO 是世界上首个业务运行的星载气溶胶和云激光雷达卫星,将星载激光雷达从试验阶段推向了应用阶段。图 6 为卫星和有效载荷图。

CALIOP 轨道高度 705 km,采用 1 m 口径接收望远镜,重频为 20 Hz,双波长单脉冲能量都约为 110 mJ。其中 532 nm 为偏振测量通道。1 064 nm 采用 APD 探测,器件性能与 LITE 的 APD 相同,532 nm 通道回波则采用 PMT 模拟探测实现,通过 PMT 后的双增益通道实现了 22 bit 的大动态范围。如图 7 所示,CALIOP 在轨寿命设计为 3 年,但实际工作年限已超过 10 年,至今仍能提供探测数据。

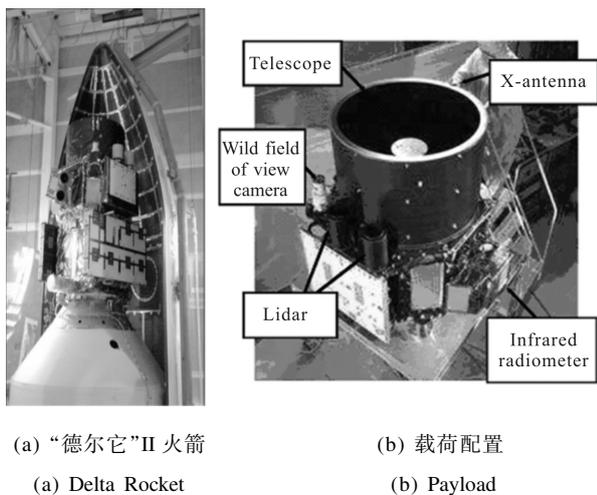


图 6 CALIPSO 卫星

Fig.6 CALIPSO satellite

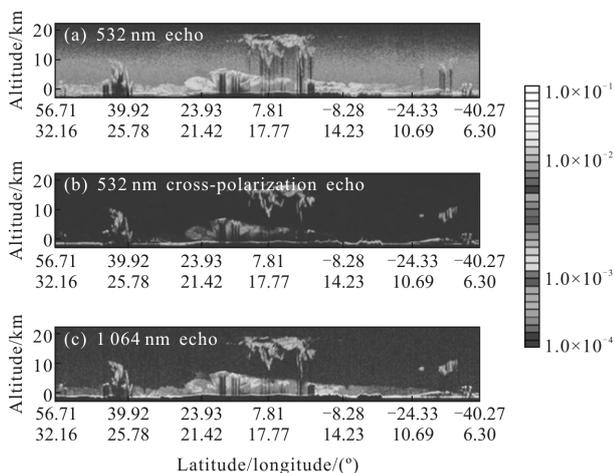


图 7 CALIOP 系统于 2006 年 6 月 9 日探测得到的数据

Fig.7 CALIOP data on Jun 9th, 2006

上述 3 个典型的激光雷达载荷都是基于后向散射机制的直接强度探测原理，以全固态 1064 nm 及其倍频激光为光源，以 PMT 和 APD/GAPD 为探测器，采用大口径光学系统，测量数据经处理形成标准化、模块化的各级产品。这些构成了后续激光雷达的基本框架。这些产品及等级和组合满足不同的应用需求<sup>[22-30]</sup>，而要达成载荷或卫星的科学和工程目标，数据反演与处理技术水平、关联数据与基础数据的支持能力，都是极其重要的，有时甚至起到决定性的作用。这也是往往容易被忽视的。

1.1.4 大气激光雷达

欧空局(ESA)计划 2018 年(原计划 2013 年)发射的 EarthCARE 卫星将搭载 ATLID、多普勒云雷达(CPR)、多光谱成像仪(MSI)和宽带辐射计(BBR)4 个

有效载荷。其中 ATLID 是一个单波长高光谱分辨率激光雷达，用于监测大气中的气溶胶和云，获得气溶胶和云的垂直廓线图，对气溶胶、云和辐射的相互作用进行准确的量化分析，为气候模型和数值天气预报模型提供更多的观测信息。EarthCARE 任务将通过这 4 种有效载荷协同工作，实现对目标的高精度观测，但是这将增加卫星和有效载荷的设计难度，必须对 4 种有效载荷进行联合校正，并满足定向稳定性要求。

LITE、GLAS 与 CALIOP 作为同一类激光雷达系统，都是利用米散射信号在假设一些特定参数的情形下进行反演，提供气溶胶的垂直分布数据，如通过后向散射廓线得到气溶胶层的高度，通过反演得到消光系数。以上 3 个系统的不足主要表现在：(1) 必须用无气溶胶高度区域的信号进行标定；(2) 只能在夜晚进行标定，因而白天常数漂移未知；(3) 气溶胶光学特性反演需要知道激光雷达比，该值与气溶胶化学成份、粒径大小及形状密切相关因而变化极大造成反演结果有很大误差。

采用高光谱分辨技术的 ATLID 激光雷达则能提供更准确的气溶胶、云反演系数。图 8 即为高光谱分辨激光雷达的探测原理。激光与大气相互作用的弹性后向散射回波由米散射(云、气溶胶)和瑞利散射(大气分子)两种信号叠加合成。由于大气分子的多普勒谱线展宽远大于气溶胶粒子展宽，可以用高光谱分辨技术从回波中提取出瑞利散射信号以及总散射信号。由于瑞利散射信号仅和大气分子有关，因而

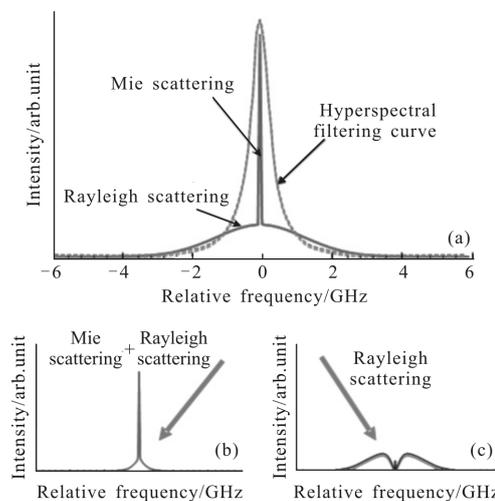


图 8 高光谱分辨激光雷达探测原理

Fig.8 Detection principle of hyperspectral resolution lidar

可以直接得到气溶胶与大气分子的后向散射比,在已知大气分子分布的情况下还可以准确反演大气总的消光系数进而获得云、气溶胶的更多信息。

如图 9 所示,ATLID 为典型的收发平行轴结构,激光波长为 355 nm,重复频率 51 Hz,输出单脉冲

能量 35 mJ,望远镜口径 620 mm,接收视场角小于 75  $\mu$ rad,具备高光谱分辨和偏振探测能力。ATLID 的轨道高度为 400 km,远低于 CALIOP 的 700 km,其地面光斑小于 30 m,垂直分辨率 100 m。值得一提的是,ATLID 没有使用常规的 APD、PMT 类器件,而是采用 E2V 公司开发的 Advance CCD,该器件可以实现近光子级的探测能力,同时又具备极高的时间分辨率来满足垂直结构探测的需求。

高光谱分辨激光雷达的优势:(1) 可以进行内部标定;(2) 不需要米散射反演消光系数;(3) 更精确的气溶胶层边界探测;(4) 不需要假设激光雷达比;(5) 可以为区分气溶胶类型提供更有力的数据;(6) 具有构成“ $3\beta+2\alpha$ ”(三波长后向散射+两波长消光系数)数据进行气溶胶粒径分布及密度分布的潜力。因而 ATLID 可以为相关研究带来更精确的探测数据,但 ATLID 仅使用 355 nm 单波长探测,无法反演粒径信息。

### 1.1.5 云-气溶胶传输系统

云-气溶胶传输系统 (Cloud-Aerosol Transport System, CATS)是 NASA 开发的用于气溶胶、云三维分布探测的激光雷达,于 2015 年 1 月安装到国际空间站,在轨示意图如图 10 所示。它是第一台空间站

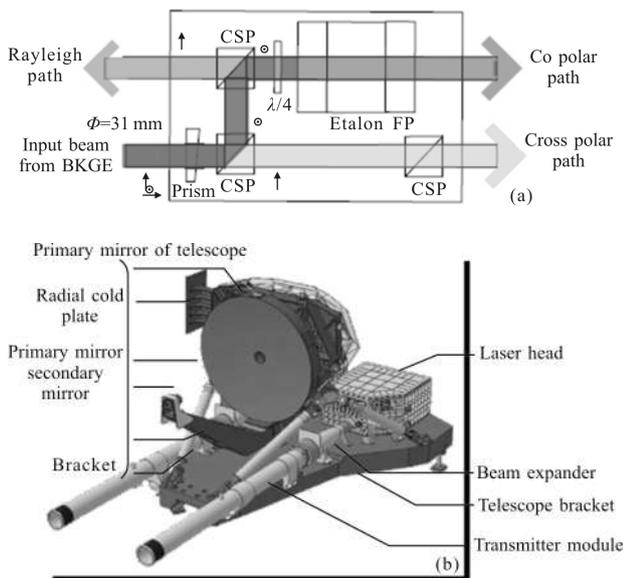
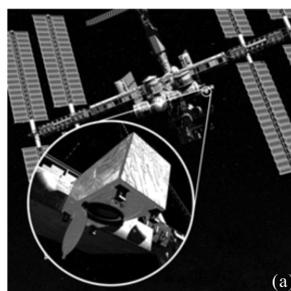


图 9 ATLID 结构示意图

Fig.9 ATLID structure



Science mode 1 1 064,532 nm backscatter lidar No HSRL Depolarization at 532,1 064 nm Mission goals: A,B	Science mode 2 1 064,532 nm backscatter lidar 532 nm HSRL Depolarization at 1 064 nm Mission goals: C,A(partial)	Science mode 3 1 064,532,355 nm backscatter lidar No HSRL Depolarization at 1 064,532,355 nm Mission goals: A,B,C	Science mode 4,5,6(Backup) Same capability as science mode 1, but using laser 2 and different FOV selections
(b)	(c)	(d)	(e)

图 10 CATS 在轨示意图

Fig.10 CATS in-orbit

搭载的大气探测激光雷达,也是第一台星载高重频、微脉冲、偏振、高光谱分辨激光雷达,整体质量500 kg。

CATS 的主要任务是:(1) 作为 CALIPSO(2006)/EarthCARE(2016)/ACE(2020)的过渡,监测云气溶胶三维数据;(2) 积累云气溶胶数据用于改进气溶胶预报模型;(3) 对高光谱分辨技术、单频高稳定激光器技术、三波长技术进行摸底试验,为气溶胶-云-生态系统(ACE)激光雷达的研制提供试验资料。为了完成上述任务,CATS 设计了 6 种工况(表 2)。分别验证高重频技术、双波长技术、三波长技术、高光谱分辨技术、偏振技术等技术。

表 2 CATS 工作模式

Tab.2 CATS work pattern

Work pattern	Wavelength/nm							
	1 064		532		HSRL	355		
		⊥		⊥			⊥	
1	✓	✓	✓	✓	-	-	-	
2	✓	✓	✓	-	✓	-	-	
3	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	
4	✓	✓	✓	✓	-	-	-	
5	✓	✓	✓	✓	-	-	-	
6	✓	✓	✓	✓	-	-	-	

CATS 已成功在轨运行 2 年余,并可以提供全球气溶胶-云垂直结构数据产品。但基于 CATS 产品的研究报告不多,其技术验证和摸底的效果和质量尚未有明确结论。笔者认为,高重频微脉冲技术可以有效降低载荷功耗和规模,但由于增加了绝对曝光时间,其在白天的工作效能也将受到背景光的更大制约,因此对激光光线宽和滤光系统带宽提出了更高的要求。

1.1.6 先进地表激光测高系统(ATLAS)

预计 2018 年发射的 ICESat-2 卫星搭载的激光雷达先进地表激光测高系统 (Advanced Topographic Laser Altimeter System, ATLAS) 采用多波束、高重频、微脉冲、光子技术探测技术<sup>[30-33]</sup>,其主要任务为极地冰层、海洋冰厚、地形、云-气溶胶、植被高度、海洋环境等的全球观测。

ATLAS 的方案较 GLAS 有了较大改变,激光波长 532 nm,重频 10 kHz,脉宽小于 1.5 ns,脉冲能量为 2 mJ,利用高能激光器对地发射一束激光,通过

衍射光学元件分离成 6/9 个光束,分 3 组平行排列,中间一组波束能量高于两侧,每组之间地面距离 3 km,每组内部每个光束地面距离 500 m,激光发散角为 20 μrad,光斑直径 10 m。为了使 9 个光束在地面上能够实现精确定位,ATLAS 将使用通用的定标星场,实现激光波束的精确定位。高重频、小光斑提高了定位精度,减小了地形对测量精度的影响。通过激光测高数据与地形数据匹配,获取控制点,准确找到激光脚点位置,并根据地面控制数据检校激光测高仪的几何定位模型,实现高精度三维定位。另外,多源遥感数据融合应用时,以激光测高数据与地形数据匹配为中介,可以实现激光数据与遥感图像等其他地理数据的空间配准,如图 11 所示。

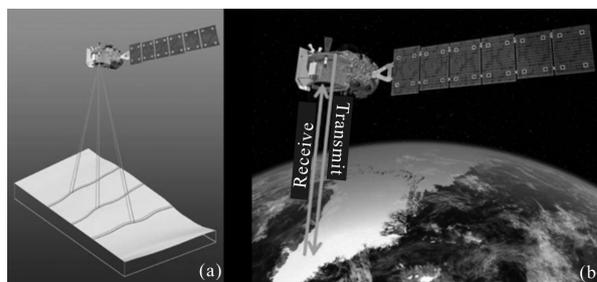


图 11 ICESat-2 在轨工作示意图

Fig.11 ICESat-2 in-orbit

对大气和海洋环境探测应用,高重频体制有利于提高云层的穿透率和大气水平分辨率,多波束则在提高大气探测水平分辨率的同时提高了穿轨方向的水平分辨率和覆盖范围,单光子和高重频探测有效提高了回波信号的动态范围,提高了系统对大气变化的适应性。但高重频体制将带来背景光积分时间的增加,其白天大气探测能力还有待于在轨验证,另外,在高机动平台上如何保证探测效率、精度、数据有效性等还有待进一步验证。

1.2 风场探测激光雷达

激光雷达可以通过测量由于风场导致的大气粒子群运动对入射激光产生的多普勒频移反演风速,主要分为相干和直接(非相干)多普勒探测。测风激光雷达的概念于 20 世纪 60 年代提出,多普勒测风激光雷达技术于 80 年代发展起来,美、欧、日、俄等国家已发展出系列产品应用于地基和空基平台。地基方面,只有美、日、欧等建立了以卫星为平台的风场探测计划并分别选择各自最佳的多普勒激光雷达

设计方案,开展风场探测方面的研究。

1984 年美国 NASA 的全球风研究研讨会提出激光大气风探测(LAWS)系统,作为其地球观测系统(EOS)的一个重要组成部分。原计划发展相干多普勒测风激光雷达,但因经费原因计划中断。其后 1997 至 1999 年 NASA 又开展了 SPARCLE (相干激光雷达空间稳定性试验)项目,因经费原因中断。同时进行的直接探测(非相干式)多普勒测风激光雷达研制计划也因经费原因中断。1998~2007 年间欧空局 ESA 提出的大气动态任务-风神计划 (ADM-Aeolus),研制用 355 nm 激光进行直接探测的测风激光雷达系统 ALADIN。近年来 NASA 与 NOAA 合作,正在研究混合方式的天基测风激光雷达系统原型全球风场观测系统(GWOS)。其主要技术特点为:利用 355 nm 波长进行 20 km 以下的非相干探测,利用 2 μm 波长进行 2 km 以下相干探测。利用前后两个观测视角实现矢量风场观测。

1.2.1 大气激光多普勒载荷

ESA“大气动态任务”(ADM-Aeolus)卫星将成为世界上首个星载多普勒测风激光雷达卫星任务 [34-35]。ADM-Aeolus 任务的科学目标是对全球风场进行三维观测,获取对流层和较低平流层的垂直风廓线图,改进数值天气预报准确度,提高对大气动力学和气候变化的研究水平。ADM-Aeolus 卫星只搭载大气多普勒激光雷达(ALADIN),其将成为世界上首个星载多普勒测风激光雷达。

ALADIN 是一个非相干多普勒测风激光雷达,系统主要由激光器、发射/接收望远镜、接收器和控制与数据管理模块组成。ALADIN 设计测速范围±150m/s,探测范围 0~30 km。低空大气(0~2 km)垂直分辨率 0.5 km,测速精度 1m/s;高空大气(2~16km)垂直分辨率 1 km,测速精度 2 m/s;16~30 km 垂直分辨率 2 km。

ALADIN 在 400 km 轨道高度上测量 30 km 以下单视线径向风速,采用 1.5 m 大口径轻质无焦点卡塞格伦望远镜,光源为 Nd:YAG 发射 355 nm 激光脉冲,脉冲能量 120 mJ 重频 100 Hz。采用 Rayleigh 光谱仪和 Mie 光谱仪作为直接探测接收器,Rayleigh 光谱仪采用双边缘探测技术,分光系统将信号分为两路,一路用干涉仪分析较强的低空气溶胶和云层回波,另一路用双边缘通道分析较弱的分子散射回波。两路信号用累积型 CCD(ACCD)分别进行准光子探测,见图 12。

ALADIN 具有单一固定视距,沿着固定视距每

200 km 获取一次 0~30 km 高度范围内的风廓线数据,用时 28s,通过平均多点光束重叠,可获取精度更高的廓线图,每 50 km 获取一次时,用时 7 s,通过遥测指令可在 0.7~50 km 之间选择更短的平均长度。

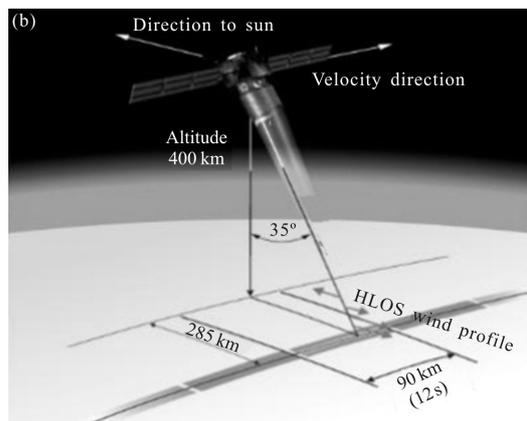
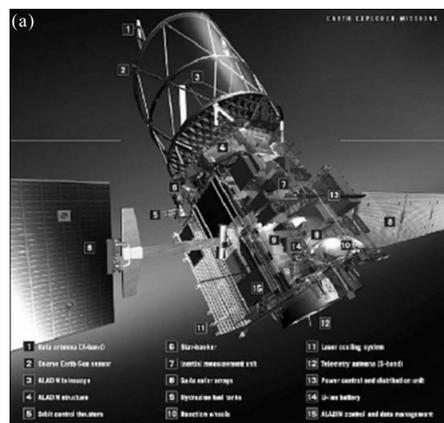


图 12 ALADIN 效果图和探测模型

Fig.12 ALADIN effect picture and detection model

ESA 规划的 ADM-Aeolus 的后续任务以 ADM-Aeolus 任务的激光雷达为基础,研制两颗 Aeolus 卫星,一颗卫星侧向探测,另一颗卫星后向探测,一前一后运行在同一轨道上,如图 13 所示。这种编队方式能够有效提高覆盖能力,改进天气预报的准确度。

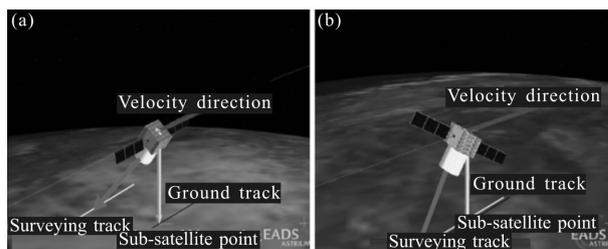


图 13 两颗 Aeolus 卫星编队方式

Fig.13 Two Aeolus satellites formation flying pattern

### 1.2.2 全球风场观测系统

虽然经历了几次项目因经费或技术问题中断,但美国科学家在地面和机载试验方面依然进行了大量的技术储备和相关论证。2006 年启动了星载混合型多普勒测风激光雷达(Hybrid Doppler Wind Lidar, HDWL)GWOS 研究计划<sup>[36-41]</sup>,该系统采用相干/非相干混合探测机制,其中边界层内用探测精度较高的相干探测,边界层外用探测精度较低的直接非相干探测。系统运行轨道高度为 400 km 的太阳同步轨道,有 4 个口径 0.5 m 的接收望远镜,各望远镜视场方向与天底角呈 45°,分布在运行轨道两侧。利用地球的曲率可以用前向和后向望远镜观测到的风速廓线反演同一观测地点的三维风场信息,见图 14。

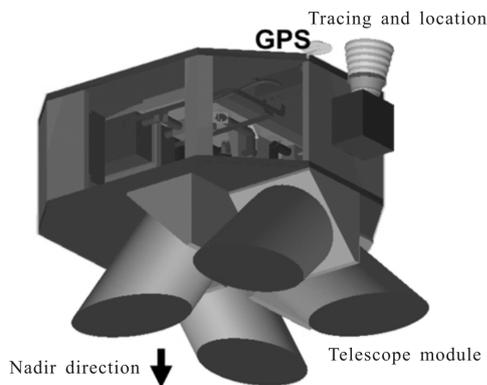


图 14 GWOS 效果图

Fig.14 GWOS effect picture

GWOS 激光雷达系统为同轴系统。其中直接探测利用 355 nm 波长,脉冲能量 360 mJ,重复频率 100 Hz,相干探测利用 2 053 nm 波长,脉冲强度约 250 mJ,重复频率 5 Hz,积分时间 12 s。其中直接探测风速误差要求小于 3 m/s,相干探测风速误差小于 1.5 m/s,如图 15 所示。

GWOS 与 ADM 相比,主要的不同点在于:(1) ADM 主要用于夜间而 GWOS 可以全天观测;(2) ADM 仅有一个观测角而 GWOS 有 4 个;(3) 观测廓线上 ADM 只有单廓线,而 GWOS 通过 4 个光学镜头实现两组双视向矢量风场观测,最终借助相关气象模型,获取三维矢量风场观测;(4) ADM 廓线地面观测气团网格约 50 km×50 km,水平分辨率为 200 km;而 GWOS 地面观测气团网格约为 100 km×100 km,水平分辨率约 350 km;(5)垂直分辨率方面边界层内两系

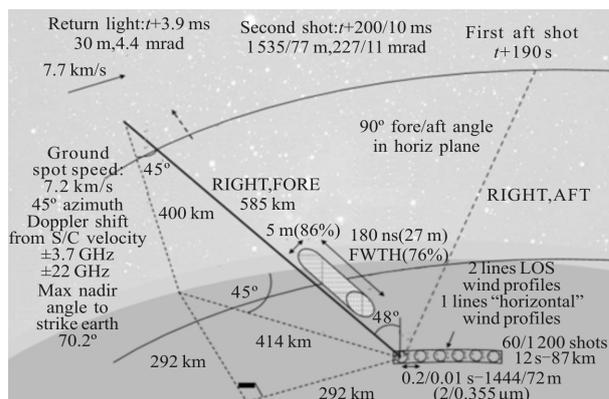


图 15 GWOS 三维测风原理

Fig.15 GWOS 3-dimensional wind measurement

统都为 0.25~0.5km,对流层 ADM 为 1km 而 GWOS 约为 1~2km。除此之外,美国计划在 GWOS 后的 2026 年左右再发射长期应用的 NWOS 混合测风激光雷达,预期轨道高度 824 km,其他参数与 GWOS 相近。

### 1.3 分子探测激光雷达

A-SCOPE 是欧洲 ESA 提出的针对大气 CO<sub>2</sub> 垂直分布进行探测的备选天基激光雷达系统<sup>[42-44]</sup>。激光雷达精确探测分子密度主要用差分吸收的方法,该方法有两种体制,一种为距离分辨差分吸收,另一种为积分路径差分吸收。由于 CO<sub>2</sub> 在大气中的含量较少,距离分辨探测时需要长时间积分,这种体制不适合天基探测,而路径积分探测则可以获得高精度和高水平分辨率的 CO<sub>2</sub> 柱线浓度。因而 A-SCOPE 的载荷为天基积分路径差分吸收 (Integrated Path Differential Absorption, IPDA)激光雷达。A-SCOPE 的探测原理见图 16,系统工作在 2.05 μm 激光波长。

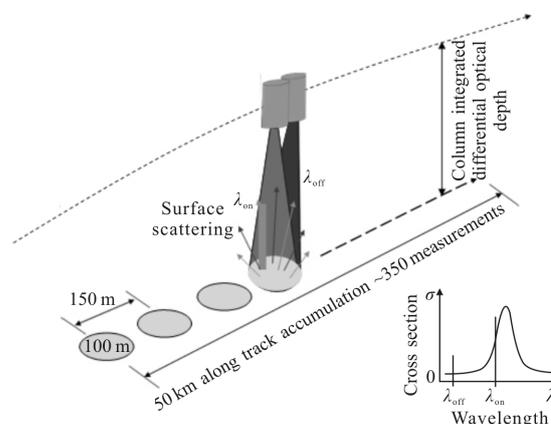


图 16 A-SCOPE 探测原理图

Fig.16 Principle diagram of A-SCOPE detection

在运行时系统对地发射 2 个波长的激光, 这 2 个波长分别位于  $\text{CO}_2$  的吸收线( $\lambda_{\text{on}}$ )和  $\text{CO}_2$  的非吸收线( $\lambda_{\text{off}}$ )。两个波长的激光经地面散射后返回激光雷达, 位于吸收线的  $\lambda_{\text{on}}$  信号中携带了  $\text{CO}_2$  柱线吸收信息, 通过  $\lambda_{\text{off}}$  参考信号可以得到  $\text{CO}_2$  柱密度, A-SCOPE 预期的探测精度为 0.5 ppm@50 km。国内在研的天基  $\text{CO}_2$  激光雷达系统也采用了这种技术。

美国 NASA 提出的 ASCENDS 系统计划于 2022~2025 年发射<sup>[45-46]</sup>, 也采用 IPDA 体制探测。但是该系统使用 10 kHz 高重频激光发射, 采用波长扫描技术, 通过 8 个波长完成一次  $\text{CO}_2$  1.572 33  $\mu\text{m}$  单吸收线的扫描, 8 个波长扫描的回波信号可以拟合出较理想的吸收光谱, 再通过吸收光谱反演  $\text{CO}_2$  的浓度。波长扫描技术可以有效降低激光雷达发射系统和接收系统的波长稳定性对探测的影响, 也可以规避多普勒频移带来的影响, 因而可以有效提高探测精度, 其设计值可达 1 ppmV@100 km, 目前该技术已完成了机载试验, 结果达到了预期要求, 见图 17。

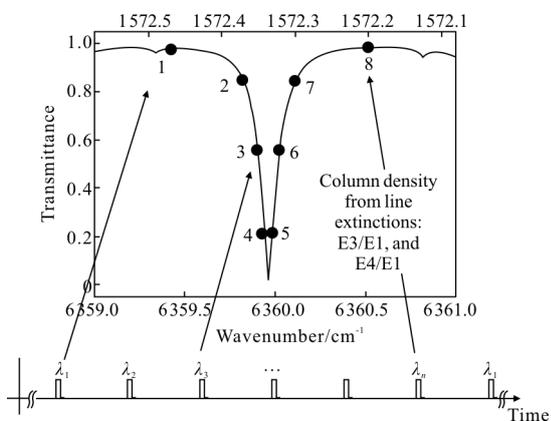


图 17 ASCENDS 波长扫描差分吸收原理

Fig.17 ASCENDS wavelength scan differential absorption

## 2 发展与展望

### 2.1 天基激光雷达/遥感技术是对地观测的重要手段

激光雷达/激光遥感在地球科学、对地观测、定量遥感中的重要性、可行性已成为各航天国家、机构和学者的共识, 这一点是毋庸置疑的。已发射的几型天基激光雷达的在轨成功试验和优异表现, 展示了激光雷达作为一种新兴的空间遥感装备在这一应用领域的独特的、不可替代的能力, 也有力推进到了各

国的发展计划, 如美国“对地观测系统”(EOS)计划、ESA“全球环境与安全监测”(GMES)计划等都把天基激光雷达列为核心技术。目前, 美国、日本和欧洲等国家和地区或是为了保证任务的连续性, 建立了现有天基激光遥感系统的后续任务; 或是提出了新的天基激光雷达观测任务, 扩展激光雷达技术的观测范围和应用领域; 或是开发新概念或新技术的激光雷达系统, 并利用机载平台进行验证, 为未来应用到天基平台做技术储备。国内在“高分辨率对地观测系统”、“空间基础设施”等重大专项和工程中也安排了相关题目预研和在研型号。

可以预期, 天基激光雷达已步入发展的快速车道。

### 2.2 充分发挥、发掘天基激光雷达的独特优势

天基激光雷达的独特优异性能源自激光的相干性、单色性、高亮度、方向性, 所以, 激光雷达特别适合径向/垂直方向线型廓线高时空高分辨率、高精度、分层测量, 以及小尺度/超小尺度精细颗粒物理、化学属性、空间分布的测量。激光雷达在云和气溶胶、大气成分、全球风场、森林植被、碳汇碳源等领域具有其他探测手段所无法比拟的优势。这些领域测量的共同特点是径向/垂直探测、稀疏采样、指向精度要求不高、单次发射探测率和 S/N 较低、需大量统计处理等。

在地形测绘/测图方面, 以保证探测率、虚警率为前提, 为解决激光测量网格密度低、光斑形状、大气传输、平台姿控等因素导致的激光测点与照相测点精确配准难题, 需要星上配置若干辅助测量设备、地面检校场地和大量数据系统支持, 才能保证稀疏点阵的测量精度。考虑到地形地貌及天候的影响, 其可用性、有效性、实效性、系统费效比不够高。针对此, 解决的方案包括发展相控阵、合成孔径等新体制激光雷达, 以及新型高效激光器、高灵敏大面阵探测器等新器件。这方面, 激光雷达是微波雷达的强有力竞争对手。

美国规划的新一代星载激光三维成像雷达 LIST 提出 1 000 波束、超小密集光斑, 高重频, 微脉冲、单光子探测的技术路线, 历经多年仍在关键技术研究, 国外测绘用途的卫星也鲜有激光雷达配置。

由于激光回波包含了对在其传输路径上的多种目标特性信息, 对激光探测信息的深度全面发掘, 变得越来越重要。

### 2.3 天基大气环境观测激光雷达技术特点

纵观上述天基激光雷达,主要技术特点如下:光源多选成熟的DPL全固态激光器;波长 $2\ \mu\text{m}$ 、 $1\ 064\ \text{nm}$ 及其倍频光 $532\ \text{nm}$ 、 $355\ \text{nm}$ ;低重频大能量激光器技术成熟,高重频微脉冲在探索中;大口径光学接收;探测器以APD、GAPD、PMT、CCD为主,多元/阵列探测器由于与激光器、接收光学、信号处理能力深度关联,直接应用尚待时日;探测体制多样化,直接能量探测技术成熟,应用最多,相干探测已在型号研制中,光子探测技术值得关注,不同的体制有适合的应用方向和范围,要根据任务需求合理选择。

天基激光雷达由于搭载平台的限制,特别考虑体积、功耗、热管理、长寿命、高可靠等方面的约束,所以,天基激光雷达的总体方案是一个在平台约束下、针对任务需求的发射、接收、探测、处理、规模等多参数寻优和平衡的过程,还要综合考虑需求迫切性、周期、投入等非技术因素。

天基大气环境观测激光雷达的输出成果为经事后处理形成的各级标准化、模块化产品。这些不同等级的产品及其组合对应了不同的应用需求。所以,其测量数据分析、判识、同化、反演是雷达研制的重要组成部分,也是激光雷达设计和优化的重要依据。数据反演、同化不仅需要高水平的专业人才,也与关联数据与基础数据的支持能力密切相关。

### 2.4 多源融合、多星组网实现更全面、更系统的科学观测

天基激光雷达、可见光、红外、微波遥感器各有特点,单一手段难以完成对目标的全面、系统、高效的科学观测,必须针对测量任务需求,科学配置多手段观测,实现波段优势互补,信息多源融合,设备协同工作,形成多维、全向、立体、精细分层的定量观测场。如EarthCARE任务等,除了搭载激光雷达系统外,还搭载了可见光相机、微波雷达、红外相机等有效载荷,其目标是建立多种探测方式相结合的协同探测体系,发挥遥感系统的综合优势,对目标进行更全面、更系统的科学观测,探测满足大气科学研究和实际应用的需要,真正实现全天候、全覆盖的精准观测。

另外,业务星向星座方向发展,在单星试验取得成功后,后续业务星采用组网运行,提高卫星载荷任务的覆盖、时效、关联性,是未来发展的值得关注的重要方向。

### 参考文献:

- [1] Huang Jian, Hu Shunxing, Cao Kaifa, et al. Remote sensing system for vertical profiles of atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0417004. (in Chinese) 黄见, 胡顺星, 曹开法, 等. 可用于探测大气CO<sub>2</sub>垂直廓线的无线传感系统 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0417004.
- [2] Liu Bingyi, Zhuang Quanfeng, Qin Shengguang, et al. Aerosol classification method based on high spectral resolution lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0411001. (in Chinese) 刘秉义, 庄全风, 秦胜光, 等. 基于高光谱分辨率激光雷达的气溶胶分类方法研究 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 0411001.
- [3] Hui Wen, Huang Fuxiang, Guo Qiang. Combined application of lightning detection data from satellite and ground-based observations [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(1): 218-229. (in Chinese) 惠雯, 黄富祥, 郭强. 卫星与地基闪电探测资料在闪电活动研究中的综合应用 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(1): 218-229.
- [4] Fu Chuanbo, Dan Li, Tang Jiexiang, et al. Temporal and spatial characteristics of haze days and their relations with climatic factor during 1960-2013 over South China [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(5): 1313-1322. (in Chinese) 符传博, 丹利, 唐家翔, 等. 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): 1313-1322.
- [5] Liu Dong, Liu Qun, Bai Jian, et al. Data processing algorithms of the space-borne lidar CALIOP: a review [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1202001. (in Chinese) 刘东, 刘群, 白剑, 等. 星载激光雷达CALIOP数据处理算法概述 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(12): 1202001.
- [6] Wang Guizhi, Gu Saiju, Chen Jibo. Assessment of the indirect economic loss caused by heavy haze in Beijing based on input-output model [J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(1): 17-19. (in Chinese) 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.
- [7] Ren Fumin, Gao Hui, Liu Lvliu, et al. Research progresses on extreme weather and climate events and their operational

- applications in climate monitoring and prediction [J]. *Meteorological Monthly*, 2014, 40(7): 860–874. (in Chinese)
- 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.
- [8] Li Qingquan, Sun Chenghu, Yuan Yuan, et al. Major advances of China climate monitoring and diagnosis operation in recent 20 years [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2013, 24(6): 666–676. (in Chinese)
- 李清泉, 孙丞虎, 袁媛, 等. 近20年我国气候监测诊断业务技术的主要进展[J]. 应用气象学报, 2013, 24(6): 666–676.
- [9] Xiao Ziniu. Advances of the short range climate monitoring and prediction in China [J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(7): 21–25. (in Chinese)
- 肖子牛. 我国短期气候监测预测业务进展 [J]. 气象, 2010, 36(7): 21–25.
- [10] Claus Weitkamp. Lidar Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere [M]. New York: Springer, 2005: 1–18.
- [11] Takashi Fujii, Tetsuo Fukuchi. Laser Remote Sensing [M]. Boca Raton: CRC Press, 2005: 1–36.
- [12] Winker D M, Couch R H, McCormick M P. An overview of LITE: NASA's lidar in-space technology experiment [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1996, 84(2): 164–180.
- [13] Ansmann A, Müller D, Wandinger U, et al. Lidar profiling of aerosol optical and microphysical properties from space: overview, review, and outlook [C]//First International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment, Proc of SPIE, 2013, 8795: 879502.
- [14] Guennadii G Matvienko. Modern concept of a spaceborne lidar[C]//Sixth International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, SPIE, 2001, 3983: 250–259.
- [15] Schutz B E, Zwally H J, Shuman C A. Overview of the ICESat Mission[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L21S01.
- [16] Sarah DeWitt. Ice cloud and land elevation mission comes to an end. space daily[EB/OL]. [2010–08–31]. [http://www.spacedaily.com/reports/Ice\\_Cloud\\_And\\_Land\\_Elevation\\_Mission\\_Comes\\_To\\_An\\_End\\_999.html](http://www.spacedaily.com/reports/Ice_Cloud_And_Land_Elevation_Mission_Comes_To_An_End_999.html).
- [17] Paoli F, Blouvac J. CALIPSO: a small satellite in low earth orbit for the study of the clouds and aerosols [C]//Proceedings of the IAC, 2005: IAC–05–B5.2.02.
- [18] 8th CALIPSO Exploitation Review, 3rd Mission Extension Review (REDEM) at CNES Toulouse[EB/OL]. [2015–05–05]. [http://calipso.cnes.fr/en/CALIPSO/GP\\_actualite.htm](http://calipso.cnes.fr/en/CALIPSO/GP_actualite.htm).
- [19] Bézy J –L, Leibrandt W, Hélière A, et al. System, spacecraft, and instrument concepts for the ESA Earth Explorer EarthCARE Mission [C]//Proceedings of 11th SPIE International Symposium on Remote Sensing, 2005, 5978: 19–22.
- [20] David Starr. NASA's Aerosol-Cloud-Ecosystems (ACE) mission [C]//Hyperspectral Imaging & Sounding of the Environment, 2011.
- [21] Ti Chuang, Patrick Burns, Walters E B, et al. Space-borne, multi-wavelength solid-state lasers for NASA's cloud aerosol transport system for international space station [C]//SPIE, 2013, 8599: 85990N–1–14.
- [22] Sun Qiang, Fan Xuehua, Xia Xiang' ao. Observation and analysis of aerosol vertical distribution characteristics in north china plain [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2016, 39(1): 73–79. (in Chinese)
- 孙强, 范学花, 夏祥鳌. 华北地区气溶胶垂直分布特征的观测与分析[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(1): 73–79.
- [23] Wang Chaojie, Wang Bo, Guo Huinan, et al. Online measurement of atmospheric density based on space vehicle platform[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 15–20. (in Chinese)
- 王超杰, 王博, 郭惠楠, 等. 空间飞行器平台大气密度的在轨测量[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 15–20.
- [24] Lu Xianyang, Li Xuebin, Qin Wubin, et al. Retrieval of horizontal distribution of aerosol mass concentration by micro pulse lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(7): 1697–1704. (in Chinese)
- 鲁先洋, 李学彬, 秦武斌, 等. 微脉冲激光雷达反演气溶胶的水平分布[J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1697–1704.
- [25] Jiang Xuegong, Chen Shoujun, Yun Jingbo. Analysis on characteristics of vertical structure of sand and dust during dust storm process based on CALIPSO data [J]. *Meteorological Monthly*, 2014, 40(3): 269–279. (in Chinese)
- 姜学恭, 陈受钧, 云静波. 基于CALIPSO资料的沙尘暴过程沙尘垂直结构特征分析[J]. 气象, 2014, 40(3): 269–279.
- [26] Winker D, Vaughan M, Hunt B. The CALIPSO mission and initial results from CLIPOP [C]//Lidar Remote Sensing for Environmental MonitoringVII, 2006, 6409: 640902.
- [27] Rodier S, Zhai P, Josset D, et al. CALIPSO lidar measurements for ocean sub-surface studies [C]//34th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 2011.
- [28] James H Churnside, Brandi J McCarty, Lu Xiaomei.

- Subsurface ocean signals from an orbiting polarization lidar [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(7): 3457–3475.
- [29] Behrenfeld M J, Hu Yongxiang, Hostetler C A, et al. Space-borne lidar measurements of global ocean carbon stocks [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(16): 4355–4630.
- [30] WMO. Instrument: ATLAS [EB/OL]. [2012–03–04]. <http://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/51>.
- [31] Kelly M Brunt, Sinéad L Farrell, Vanessa M Escobar. ICESat–2: A next generation laser altimeter for space–borne determination of surface elevation [C]//93rd American Meteorological Society Annual Meeting, 2013.
- [32] David J Harding. NASA’s Lidar measurements of the Earth’s surface from space [C]//Proceedings of IGARSS (International Geoscience and Remote Sensing Symposium), 2012.
- [33] Charon Birkett, Markus T, Neumann T. The ICESat –2 Mission-laser altimetry of ice, clouds and land elevation and also ocean, coastal, and continental waters [C]//OSTM SWT (Science Working Team), 2011.
- [34] Zeromskis E, Wandinger U, Althausen D, et al. Coherent Doppler lidar for studies of transport and mixing processes in the lower atmosphere [C]//22nd International Lidar Conference, 2004, 561: 123–125.
- [35] Kameyama S, Ando T, Asaka K, et al. Compact all fiber pulsed coherent doppler lidar system for wind sensing [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(11): 1953–1962.
- [36] World Meteorological Organization. Preliminary statement of guidance regarding how well satellite capabilities meet WMO user requirements in several application areas [R]. WMO/TD, 1998.
- [37] Kin P Chan, Dennis K Killinger. Short-pulses coherent Doppler Nd:YAG lidar [J]. *Optical Engineering*, 1991, 14 (15): 776–785.
- [38] Beranek R G, Bilbro J W, Fitzjarrald D E, et al. Laser Atmospheric Wind Sounder (LAWS) [C]//Proc SPIE, 1989, 1062: doi 10.1117/12.951882.
- [39] Baker W E, Emmitt G D, Robertson F, et al. Lidar-measured winds from space: a key component for weather and climate prediction [J]. *Bull American Meteorological Society*, 1995, 76(6): 869–888.
- [40] National Research Council (NRC). Earth Science and Applications from Space: National Imperatives for the Next Decade and Beyond [M]. Washington DC: The National Academic Press, 2007.
- [41] Huffaker R M. Feasibility study of satellite-borne lidar global wind monitoring system [R]. NOAA Tech Memo ERL WPL–37, 1978.
- [42] Jerome Caron, Yannig Durand. Operating wavelengths optimization for a space borne lidar measuring atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Applied Optics*, 2009, 48: 5413–5422.
- [43] Caron J, Durand Y, Bezy J L, et al. Performance modeling for A–SCOPE, a space borne lidar measuring atmospheric CO<sub>2</sub> [C]//SPIE, 2009, 7479: 74790E.
- [44] Ehret G, Kiemle C, Wirth M, et al. Space–borne remote sensing of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O by integrated path differential absorption lidar: a sensitivity analysis [J]. *Applied Physics B*, 2008, 90: 593–608.
- [45] University of Michigan in Ann Arbor, Michigan, USA. Active Sensing of CO<sub>2</sub> Emissions over Night 5, Days, and Sea 50 ns (ASCENDS) Mission [R]. NASA Science Definition and Planning Workshop Report, 2008: 78.
- [46] James B Abshire, Haris Riris, Graham R Allan. A lidar approach to measure CO<sub>2</sub> concentrations from space for the ASCENDS mission [C]//SPIE, 2010, 7832, 78320D: 1–13.