

文章编号: 1001-3806(2016)05-0772-07

国外星载激光雷达研究进展

郭商勇, 胡 雄, 闫召爱, 程永强, 郭文杰

(中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190)

摘要: 星载激光雷达可以获取全球的高精度地球探测数据, 在对地观测中起到越来越重要的作用。介绍了美国和欧洲星载激光雷达的发展历程。从探测原理、探测系统和探测结果等方面分别对地球激光测高系统星载激光雷达、正交偏振云-气溶胶星载激光雷达以及大气激光多普勒测风星载激光雷达进行了详细介绍。并对3台星载激光雷达的接收望远镜的结构和材料进行了分析。可以为我国星载激光雷达的研究提供参考。

关键词: 激光光学; 星载激光雷达; 遥测; 大气探测

中图分类号: TN958.98; P111.5

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.05.032

Research development of space-borne lidar in foreign countries

GUO Shangyong, HU Xiong, YAN Zhaoai, CHENG Yongqiang, GUO Wenjie

(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Space-borne lidar could provide us with high accurate data of global detection and play more and more important role in earth observation. The development of space-borne lidars in USA and Europe was introduced in brief. Working principle, detection system and detection results of geoscience laser altimeter system spaceborne lidar, cloud-aerosol lidar with orthogonal polaritation and atmospheric laser Doppler spaceborne lidar wind measurement were summarized in detail. The construction and materials of the receiving telescopes of the above 3 spaceborne lidars were analyzed. The study provides some reference for the research of space-borne lidars in China.

Key words: laser optics; space-borne lidar; remote sensing; atmosphere measurement

引 言

地球大气层是人类赖以生存的外部环境, 与人类的生存和生活密切相关, 长久以来人们一直在努力研究地球大气及其变化对气候产生的影响。同时地球地理特征、海洋信息等也是影响地球大气及气候变化规律的重要因素。当研究大气的全球特征时, 人们需要获取大范围甚至全球范围的地球大气信息, 而这是地基探测设备所不能满足的。相对于地基设备的不可移动性及探测区域的单一性, 星载设备的优势在于可以提供全球分布的探测数据, 包括如沙漠、极地、海洋等人们无法到达的地区, 而且直接从高空进行大气探测, 还可免受低层大气的影响, 从而获取高质量的探测结果。

自从前苏联于1957-10-04成功发射了世界上第1

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项青年创新基金资助项目(GFZX04060103); 中国科学院空间科学预先研究资助项目(XDA04077400)

作者简介: 郭商勇(1976-), 男, 硕士, 助理研究员, 研究领域为大气物理学及激光雷达。

E-mail: guosy@nssc.ac.cn

收稿日期: 2015-06-26; 收到修改稿日期: 2015-08-10

颗人造卫星以来, 世界各国已发射了多种类型的卫星进行地球观测。星载激光雷达是20世纪60年代发展起来的一种高精度地球探测技术, 它利用激光束进行探测, 由于其波长较短, 可以探测到气溶胶和大气分子等直径较小的微粒并获取其在大气层中的分布信息。到目前为止, 已发射的多台星载激光雷达证明了其在地球观测中的独特优势^[1-4]。早期的星载激光雷达多以测距为主, 如美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)于1996年发射了NEAR和SLA01测距激光雷达^[5-6]。得益于激光器技术和激光雷达探测技术的发展^[7-9], 星载激光雷达逐渐探测更多的大气参量。2003-01-13, NASA发射了第1颗主要用于极地冰量测量的冰、云和陆地海拔测量卫星(ice, cloud and land elevation satellite, ICESat), 搭载了地球激光测高系统(geoscience laser altimeter system, GLAS), ICESat还可同时给出全球分布大气云层和地貌数据^[10-11]。2006-04-28, NASA和法国国家航天中心(Centre National D'Etudes Space, CNES)合作研制的正交偏振云-气溶胶激光雷达(cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization, CALIOP)成功发射, 用以探测气溶胶和云的光学性质与形态的垂直分布廓

线,成为世界上首台应用型的星载云-气溶胶激光雷达^[12-13]。欧洲航天局(European Space Agency, ESA)在 2000 年开始实施大气激光多普勒测量设备(atmospheric laser Doppler instrument, ALADIN)项目,直接从太空探测全球大气的 3 维风场,目前激光发射系统和信号接收系统都已测试完毕,计划于 2016 年发射升空。我国于 2007 年发射的第 1 颗月球探测卫星“嫦娥一号”上搭载了 1 台激光高度计^[14],实现了卫星星下点月表地形高度数据的获取,为月球表面 3 维影像的获取提供服务,是我国发射的首例实用型星载激光雷达。近年来,国内多家单位也开始进行星载激光雷达的研究^[15-17]。

本文中从探测原理、探测系统等方面分别对不同类型的星载激光雷达 GLAS, CALIOP 和 ALADIN 的发展史进行了详细介绍,并从材质和结构设计方面分析了星载望远镜系统的特点。

1 GLAS 星载激光雷达

GLAS 激光雷达采用双波长工作模式,波长分别为 1064nm 和 532nm,专门用于测量极地冰量,同时探测全球分布的地貌和大气云层数据^[18-19]。设备运行于 600km 的近圆形轨道,轨道周期为 8d。2009 年 10 月,卫星上的最后一台激光器停止工作,NASA 于 2010 年 2 月宣布 ICESat 科学任务结束。

1.1 探测原理

GLAS 激光雷达发射的 1064nm 激光束用于地形测量,1064nm 和 532nm 激光共同用于云和气溶胶等大气特性测量。高度探测的原理是通过测量自激光脉冲发射至接收到地面回波信号的时间间隔 T ,计算光在该时间间隔内所经过距离的一半,即为探测器设备至地面的距离 H ,距离计算如下:

$$H = \frac{1}{2}cT \quad (1)$$

式中, c 为真空中光速。探测器在空中的位置可由携带的全球定位系统(global positioning system, GPS)设备精准定位,同时配合星载相机和陀螺仪等设备,激光束的方向也可精确确定,这样激光束在地面上的投射点便可精确定位,激光束所经之处的地形图也就绘制出来了。GLAS 的探测精度极高,在大气透过率大于 50%、地面坡度小于 5°的情况下,其高度测量误差小于 0.1m。

1.2 探测系统

GLAS 的激光发射系统拥有 3 台相同的半导体抽运 Nd:YAG 激光器,工作状态下只使用其中一台,另外两台作为备用以延长激光雷达系统的使用寿命。为获

取较高的峰值能量,激光器采用调 Q 技术,将脉宽压缩至 4ns,系统参量见表 1。

表 1 星载激光雷达系统参量表

系统参量	GLAS	CALIOP	ALADIN	
激光波长	1064nm, 532nm	1064nm, 532nm	355nm	
脉冲能量	75mJ/35mJ	110mJ/通道	120mJ	
脉冲频率	40Hz	20.25Hz	100Hz	
脉冲宽度	4ns	20ns	30ns	
光束发散角	100μrad	100μrad	12μrad	
接收口径	1m	1m	1.5m	
结构	卡塞格林	卡塞格林	卡塞格林	
材质	铍	铍	碳化硅	
接收系统	视场角	375μrad	130μrad	19μrad
收发关系	旁轴	旁轴	同轴	
观测角度	天底	天底	35°	
检测通道数	2	3	2	

GLAS 有两个信号检测通道,532nm 检测通道中使用了一个带宽为 30pm 的标准具和一个带宽 326pm 的干涉滤光片组成了滤波系统,即使在白天也可以获得高信噪比的信号。该滤波系统的总带宽可在标准具的自由光谱范围内调节,以兼容 3 台不同激光器波长的微小差异及工作状态下每台激光器波长的微小变化,1064nm 检测通道则使用了一个 1nm 宽的滤光片。图 1 为 GLAS 的结构示意图,其中 -Z 指向与测地学天底方向偏离 0.3°(垂直于地球椭球);为使太阳充分照射电池板,ICESat 有两种飞行模式,X 轴为飞机模式下的速度方向,Y 轴为帆船模式下的速度方向^[20]。

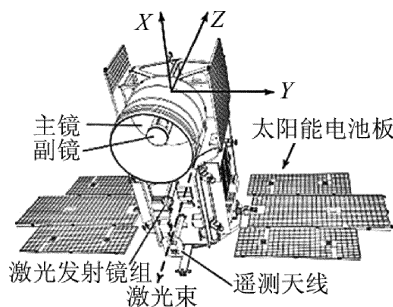


图 1 GLAS 星载激光雷达示意图

1.3 探测结果

在长达 7 年左右的运行周期中,GLAS 共开展了

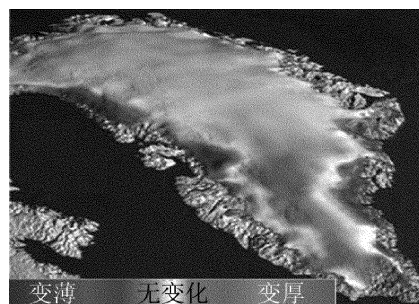


图 2 GLAS 观测到的 2003 年~2009 年格陵兰岛冰层和冰流变化图

15 次观测任务,每次持续 33d,主要进行冰盖高程测量、海冰厚度测量等,精确测量冰盖的扩张和收缩,同时评估冰盖物质平衡和对海平面上升的贡献,以及导致冰盖消长的积累率、表面消融和排冰量等因素的变化情况。此外,GLAS 还可用于测量植被高度和陆地生物量,以及应用于其它多个交叉学科。图 2 为 GLAS 激光雷达探测到的格陵兰岛冰层和冰流在 2003 年~2009 年这 6 年间变化情况。

2 CALIOP 星载激光雷达

CALIOP 星载正交偏振双波长激光雷达用于探测全球范围的气溶胶和云层垂直剖面及其光学特性^[21-22],增加人们对云、气溶胶及其相互作用的认识,提高数值天气预报能力和对气候的研究能力。云-气溶胶激光雷达和红外探测 (cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations, CALIPSO) 卫星属太阳同步极轨卫星,轨道高度 705km,轨道倾角 98.2°,探测范围 82°N 至 82°S,水平分辨率 333m,垂直分辨率 60m,轨道重复周期 16d,在轨工作时间 8 年。

2.1 探测原理

CALIOP 利用 1064nm 和 532nm 的线偏振激光束激发大气回波信号,根据微粒对线偏振激光的散射理论^[23],后向散射信号中包含平行分量和垂直分量两部分,回波功率的激光雷达方程如下:

$$P_p(z) = \frac{K_p P_1}{z^2} \beta_p(z) \exp[-2 \int_0^z \alpha_p(z) dz] \quad (2)$$

$$P_s(z) = \frac{K_s P_1}{z^2} \beta_s(z) \exp[-\int_0^z \alpha_p(z) dz - \int_0^z \alpha_s(z) dz] \quad (3)$$

式中, $P_p(z)$ 、 $P_s(z)$ 分别为高度 z 处大气回波信号的平行分量强度和垂直分量强度; K_p 、 K_s 分别为接收系统中平行和垂直分量探测通道的系统常数; P_1 为激光发射功率; $\beta_p(z)$ 、 $\beta_s(z)$ 分别为高度 z 处大气后向散射截面的平行分量和垂直分量; $\alpha_p(z)$ 、 $\alpha_s(z)$ 分别为高度 z 处大气消光系数的平行分量和垂直分量。

定义回波信号的退偏振比,见下式:

$$\delta(z) = \frac{P_s(z)/K_s}{P_p(z)/K_p} =$$

$$\frac{\beta_s(z)}{\beta_p(z)} \exp[\int_0^z \alpha_p(z) - \alpha_s(z) dz] \quad (4)$$

对于随机取向的卷云和大气气溶胶粒子,可以认为消光系数 $\alpha_p(z) = \alpha_s(z)$,令 K 为两个偏振通道的系统常数比,即 $K = K_p/K_s$,则(4)式可以写成如下形式:

$$\delta(z) = K \frac{P_s(z)}{P_p(z)} = \frac{\beta_s(z)}{\beta_p(z)} \quad (5)$$

将各高度 z 处的平行分量 $P_p(z)$ 和垂直分量

$P_s(z)$ 以及系数 K 代入(5)式,即可计算出大气退偏振比的垂直廓线 $\delta(z)$ 。

计算大气退偏振比可以判断大气微粒的形状,一般的气溶胶、云或水云中的小水滴都为球形,散射信号的垂直分量较小,退偏振比较低;而冰云中的冰晶和沙尘气溶胶一般为非球形,散射信号中的垂直分量较大,退偏振比较高(一般大于 10%)。通过比较 CALIOP 获取的 532nm 回波信号的退偏振比,可以判断不同高度上分布的微粒形状,将沙尘气溶胶与一般性气溶胶区分开来。由散射理论,微粒对光的散射强度与微粒直径有关,直径大的颗粒,如沙尘、水云微粒(直径是 10 μ m 量级),其散射强度对波长的依赖性关系较小,两波长回波信号强度之比可接近于 1;而直径较小的颗粒,如大气气溶胶,对短波长光的散射强度要大于长波长,两个波长的回波信号比就较小。通过比较 CALIOP 获取的同一高度处微粒对两个不同激光波长的散射强度,可以推断出该高度粒子的类型。

2.2 探测系统

CALIPSO 激光雷达的发射系统配备了两台完全相同的半导体抽运 Nd:YAG 激光器,工作状态下只使用其中一台激光器。两台激光器分别安装在充满干燥气体的密封空间内,内部压强一个标准大气压,为保证激光器的工作稳定,每台 Nd:YAG 激光器均由 192 个二极管阵列进行抽运,具体系统参量见表 1。

CALIOP 的接收系统由一台 1m 口径的接收望远镜和 3 个信号检测通道组成:一个 1064nm 信号检测通道和两个正交偏振的 532nm 信号检测通道。望远镜主焦点处安装了视场光阑,可将望远镜的视场限制在 130 μ rad,既完全覆盖激光束 100 μ rad 的发散角,又可减少背景杂散光的接收。接收系统的后续光路还包括准直和分光光路,将 532nm 和 1064nm 的回波信号分开。其中反射光为 532nm 信号,经窄带标准具去除太阳背景噪声后,由偏振分光器分为 532nm 平行光和 532nm 垂直光。1064nm 信号从分光镜透射出去,经干涉滤光片去除背景噪声后由探测器直接接收。每个信号检测通道中都安装了双重数字转换器,可以提供 22bit 的动态检测范围,保证云和分子散射信号都可被

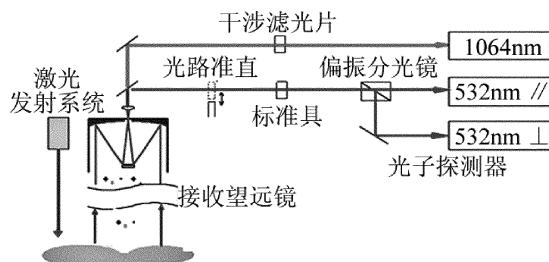


图 3 CALIOP 系统示意图

接收。CALIOP 光路示意图如图 3 所示。图 4 为 CALIPSO 卫星载荷示意图。

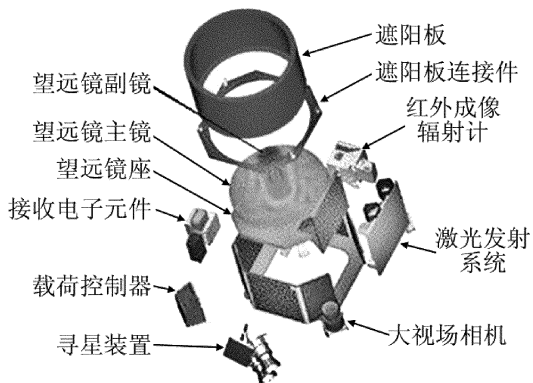


图 4 CALIPSO 载荷分布示意图

2.3 探测结果

CALIOP 星载激光雷达获取了大量的数据,在全球云和气溶胶研究中起到了重要的作用。图 5 为 2006-06-09 的探测结果,探测路线从北欧向南穿越非洲直到大西洋。可以看出,3 幅图中间区域的 10km ~ 20km 高度处回波信号都非常强,且与波段和偏振状态关系不大,根据其高度和散射信号特点,可判断该区域存在卷云。在卷云左侧的一片区域,3 幅图中都有较强的回波信号,1064nm 波长的信号稍弱于 532nm 回波信号,表明该区域为形状不规则的沙尘气溶胶微粒。图 5a 和图 5c 中卷云右边 5km 高度处都有回波信号,而图 5b 中看不到散射信号,表明该区域存在较强的气溶胶。

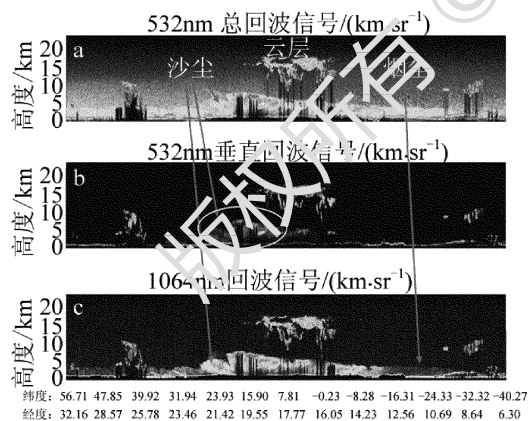


图 5 2006-06-09 CALIOP 3 个通道的探测结果

3 ALADIN 星载激光雷达

ALADIN 星载多普勒激光雷达是 ESA 目前正在开展的地球大气观测项目 (atmospheric dynamics mission aeolus, ADM-Aeolus) 的主要载荷,用于直接探测全球分布的对流层和平流层底大气风场垂直剖面,以弥补目前此类数据在海洋和极地等地区较少的不足。ALADIN 激光雷达计划运行于 400km 高度的太阳同步轨

道上,重复周期为 7d,一个周期内围绕地球运行 109 圈。探测数据可直接用于地球的能量输送研究,为更精准的数值天气预报和大气研究服务^[24-25]。ALADIN 同时还可以提供大气后向散射的高度廓线及大气消光系数,用于云和气溶胶研究。目前激光器已与发射系统已完成联合测试,计划于 2016 年发射。

3.1 探测原理

ALADIN 激光雷达采用多普勒频移原理检测地球大气风场^[26-30]。由多普勒原理,激光束与运动的大气分子碰撞时产生的散射信号相对于原激光频率就会有一定的多普勒频移,利用频谱分析器件获得该多普勒频移,即可由下式直接得到沿激光发射方向的径向风速 V :

$$V = \frac{\lambda}{2} \Delta\nu_D \quad (6)$$

式中, λ 为激光波长, $\Delta\nu_D$ 为多普勒频移。

为提高系统的测量精度,ALADIN 的接收系统采用双 F-P 标准具检测信号^[31],测量原理图如图 6 所示,两个频谱分布相同的 F-P 标准具分别位于散射谱的两边。光路系统分配至两个标准具的光强是相同的,但由于多普勒频移的影响,回波信号的光谱在两个标准具中处于不同位置,因此从两个标准具透射出来的光强不同,透射光强度可表示为:

$$I_i(\nu_R) = I_R \int_{-\infty}^{\infty} f_{R,b}[\nu_R - (\nu + \Delta\nu_D)] h_i(\nu_R - \nu_i) d\nu_R + I_M h_i(\nu + \Delta\nu_D - \nu_i) \quad (7)$$

式中, $i=1,2$, 分别表示两个 F-P 检测通道; I_R, I_M 分别为瑞利散射和米散射的光强; $f_{R,b}$ 为瑞利后向散射光谱; $h_i(\nu_R - \nu_i)$ 分别为两个干涉仪的透过率; ν 为激光频率; ν_R 为瑞利散射光谱; ν_i 分别为两个 F-P 的中心频率。由于米散射信号的谱宽度比瑞利信号的谱宽度要窄得多,因此在计算瑞利回波信号时,米散射信号的积分可用一个平均值代替。根据(7)式,将通过两个标准具的信号相比,得到比值:

$$R(\nu_R) = \frac{I_1(\nu_R)}{I_2(\nu_R)} =$$

$$\frac{\int_{-\infty}^{\infty} f_{R,b}[\nu_R - (\nu + \Delta\nu_D)] h_1(\nu_R - \nu_1) d\nu_R + I_M h_1(\nu + \Delta\nu_D - \nu_1)}{\int_{-\infty}^{\infty} f_{R,b}[\nu_R - (\nu + \Delta\nu_D)] h_2(\nu_R - \nu_2) d\nu_R + I_M h_2(\nu + \Delta\nu_D - \nu_2)}$$

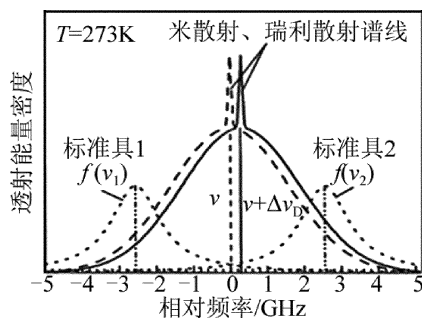


图 6 双标准具多普勒测风原理图

$$\frac{I_M h_1 (\nu + \Delta\nu_D - \nu_1)}{\{I_R\}_{-\infty} f_{R,b} [\nu_R - (\nu + \Delta\nu_D)] h_2 (\nu_R - \nu_2) d\nu_R + I_M h_2 (\nu + \Delta\nu_D - \nu_2)} \quad (8)$$

将(8)式在激光中心频率处按泰勒级数展开,并取1级近似,则径向风速可表达为如下的形式:

$$V = \frac{\lambda}{2} [R(\nu_R) - R(0)] \left(\frac{\partial R}{\partial \nu_R} \right)^{-1} \quad (9)$$

式中, $\partial R / \partial \nu_R$ 由标准具方程和瑞利散射光谱计算得到。

3.2 探测系统

ALADIN 搭载两台相同的半导体抽运 Nd:YAG 激光器,其中一台作为系统备用。为满足测风的需求,激光器系统采用窄线宽种子光注入的方式,主激光器内含 108 个半导体抽运模块,工作时启用其中的 48 个,详细参量见表 1。为消除由于设备自身运动带来的多普勒频移,激光束指向与运行方向垂直,同时与天底成 35°角。

每个探测周期为 28s,其中测量时间为 7s,激光束在地面上的投影扫过 50km 的距离,探测示意图如图 7 所示。ALADIN 激光雷达的光学结构采用收发同轴设计,激光束的发射和信号接收均通过望远镜完成。这种光路设计的优点是可以不必过多考虑望远镜的视场和激光束的同轴调节问题,最大限度地减小望远镜的视场角,提高设备的白天观测能力。系统由双标,在具检测回波信号的多普勒频移,在标准具前安装有激光斩光器和窄带滤光片减小背景噪声,回波信号最后分别由两台 CCD 接收。

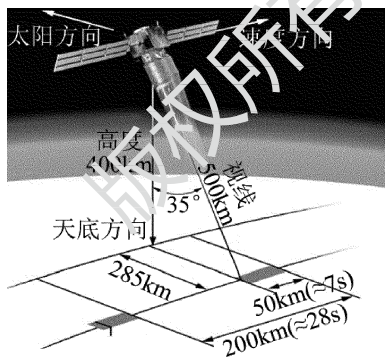


图 7 ALADIN 激光雷达探测示意图

4 星载望远镜结构及材料分析

虽然激光雷达的接收望远镜只是进行光能量收集,不必进行高精度的成像,但由于探测器的光敏面积有限以及需要消除背景噪声的影响,这对望远镜系统的成像效果提出了较高的要求。按光学结构分类,望远镜主要分为折射式和反射式^[31]。折射式望远镜以透镜作为物镜,光线经过透镜并产生弯曲,图 8 为常见

的开普勒折射式望远镜光路示意图。折射式望远镜具有结构简单、性能稳定的优点。但其缺点也很明显:(1)光线要经过镜片内部,对整块镜片均匀性要求较高;(2)整体光路长,系统占用空间大;(3)口径增大时,像差也随之增大,镜片重量也快速增加。因此从体积和重量方面考虑,折射式望远镜都不适宜作为星载设备使用。

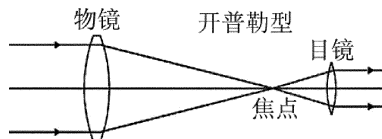


图 8 开普勒式望远镜原理示意图

反射式望远镜利用反射镜的组合反射光线,具有多种结构形式,其中最常见的是卡塞格林式。经典的卡塞格林式望远镜以抛物面镜为主镜,双曲面的副镜将光线反射穿过主镜中心的孔洞,工作原理图如图 9 所示,其中 F_1 是主镜的焦点, F_2 为卡塞格林焦点, F_1 同时也是双曲面镜的焦点, S_1 即为双曲面镜的一个焦距, S_2 为双曲面镜至卡塞格林焦点的距离。卡塞格林式望远镜拥有较小的视场,符合激光雷达对望远镜视场的要求。此外还具有适合作为星载设备的许多优点:(1)光线不经过镜片内部,不需要厚重的镜体材料,只需保证反射面的质量即可,可最大限度地减轻望远镜质量;(2)折叠式光路设计,使镜筒的长度紧缩,减小了镜体体积;(3)副镜将光线聚焦至主镜后面,适于在主焦点处安装终端接收设备且不影响光线的传输。

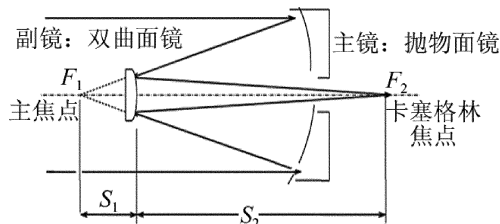


图 9 卡塞格林式望远镜原理示意图

由于卡塞格林式望远镜的这些特点,目前的星载激光雷达大都采用了这种结构设计。但相比折射式望远镜,反射式望远镜的机械结构相对复杂,对望远镜的制造材料提出了较高的要求^[32]。

星载望远镜材料的选用主要从密度、刚性、热传导率及热膨胀系数等方面综合考虑。GLAS 激光雷达和 CALIOP 激光雷达都采用了金属铍作为望远镜材料。铍在化学元素周期表中位于第二周期,原子序数为 4,属于最轻的碱土金属。铍的密度为 1.85g/cm³,相当于铝的 2/3,而强度可达到铝的 5.6 倍。同时铍具有高热传导性和低热膨胀系数的特点,热传导率为铝的

1.3倍,热膨胀系数只有铝的1/2,尤其在低温下几乎无冷缩形变发生,可大大减小由温度变化引起的镜片及机械结构形变,从而保证望远镜的光学性能。鉴于金属铍所具有的一系列优良性能,现在已被广泛地用于制造星载设备。如欧洲南方天文台的超大天文望远镜中直径为1.1m的副镜就采用了铍^[33]。目前NASA正使用的“詹姆斯·韦伯”红外太空望远镜的主镜、副镜及附件的制造材料也都使用了金属铍^[34],望远镜的直径达到6.5m,超过哈勃太空望远镜口径(2.4m)的2.5倍,但质量却只有哈勃太空望远镜的一半,且机械强度足以支持其运行至4倍于地月距离的深空。

ALADIN激光雷达望远镜系统的制造材料为碳化硅。碳化硅是20世纪80年代发展起来的新型反射镜材料,为硅与碳相键结而成的化合物,具有多种晶体结构,在大自然中存量极少,主要以莫桑石矿物形式存在。人工制造碳化硅的方法是:在1600°C~2500°C之间的高温电炉中加热二氧化硅颗粒与焦炭的混合物。碳化硅的密度为3.2g/cm³,虽然其密度比金属铍大,但其硬度很大,莫氏硬度为9.5级,仅次于金刚石(10级),用做反射镜材料时不需要太厚即可保证镜体的刚性,且不易受损。碳化硅的热传导率与金属铝相当,但热膨胀系数仅为铝的1/10,具有极好的热稳定性,温度变化几乎不会引起望远镜结构形变。近年来碳化硅材料开始越来越多地应用于天文望远镜中,ESA研制的直径为3.5m的Herschel太空望远镜主镜就采用了碳化硅材料^[35]。美国和德国联合研制的同温层红外线天文台(stratospheric observatory for infrared astronomy)机载望远镜的副镜也采用了碳化硅材料,经轻量化处理后,镜片厚度可小至2mm^[36]。表2中给出了几种望远镜材料的性能参量。

表2 几种望远镜材料性能参量

材料	密度/ (10 ³ g·cm ⁻³)	刚度/ 10 ⁹ m	热导率/ (kW·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	热膨胀系数α/ 10 ⁻⁶ K ⁻¹
铍	1.85	15.1	216	11.3
碳化硅	3.04	13	170	2.5
铝	2.7	2.7	167	22.5
石英	2.2	3.2	1.4	0.5

5 结论

星载激光雷达可以提供高精度的全球探测数据,在地球探测活动中起到越来越重要的作用。随着激光器技术和激光雷达技术的发展,星载激光雷达的探测能力也逐步得到提升。从最初的激光测距,发展到探测云和气溶胶,到实现大气3维风场的测量,星载激光雷达的探测能力逐步增强,对星载激光雷达的研究越

来越受到重视,世界各大航天大国都有各自的研究计划。中国科学院先导项目就支持开展了“大气金属层研究卫星”项目。中国科学院国家空间科学中心的研究人员对星载钠激光雷达的探测能力进行了仿真,并提出了设计方案。目前我国多家科研单位的激光雷达研制能力达到了世界先进水平,应当适时开展星载激光雷达的研究,以提高我国的地球探测能力,促进我国科研事业的发展。

参考文献

- [1] SUN X L, ABSHIRE J B, McGARRY J F, *et al.* Space lidar developed at the NASA goddard space flight center—the first 20 years[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013, 6(3):1670-1675.
- [2] LIU G, SHI W Z, YOU R. Cloud-aerosol lidar of america [J]. Spacecraft Engineering, 2008, 17(1):78-84 (in Chinese).
- [3] LI R, WANG C, SU C Z, *et al.* Development and applications of spaceborne lidar [J]. Science & Technology Review, 2007, 25(14):58-63 (in Chinese).
- [4] STAHL H F, FEINBERG L D. Summary of NASA advanced telescope and observatory capability roadmap[C]//2007 IEEE Aerospace Conference. New York, USA: IEEE, 2007:1-12.
- [5] MENZIES R T. Doppler lidar atmospheric wind sensors: A comparative performance evaluation for global measurement applications from earth orbit[J]. Applied Optics, 1986, 25(15):2546-2553.
- [6] ABSHIRE J B. NASA's space lidar measurements of earth and planetary surfaces[DB/CD]. New York, USA:OSA Technical Digest(Optical Society of America), 2010:24-28.
- [7] TEODORO F D, PAUL B, PAVEL L, *et al.* Development of pulsed fiber lasers for long-range remote sensing[J]. Optical Engineering, 2014, 53(3):1-7.
- [8] LIU B, TAO W, KE Z G, *et al.* Balance coherent detection technology of coherent lidar[J]. Laser Technology, 2015, 39(1):46-49 (in Chinese).
- [9] WANG X Q, DONG Y Q, YUAN S, *et al.* Study on simulation of micro-Doppler effect in lidar[J]. Laser Technology, 2007, 31(2):117-119 (in Chinese).
- [10] ENSSLE F, HEINZEL J, KOCH B. Accuracy of vegetation height and terrain elevation derived from ICESat/GLAS in forested areas [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 31(9):37-44.
- [11] TANG H, BROOLLY M, ZHAO F, *et al.* Deriving and validating leaf area index (LAI) at multiple spatial scales through lidar remote sensing: a case study in Sierra National Forest, CA [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 143(5):131-141.
- [12] KIM Y, KIM S W, KIM M H, *et al.* Geometric and optical properties of cirrus clouds inferred from three-year ground-based lidar and CALIOP measurements over Seoul, Korea [J]. Atmospheric Research, 2014, 139(3):27-35.
- [13] ERICA M S, SCOTT D. Global seasonal variations of midday planetary boundary layer depth from CALIPSO space-borne lidar [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2013, 118(3):1226-1233.
- [14] PING J S, SU X L, LIU J Z, *et al.* External calibration for laser altimetry mission in Chang'E-1 [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2013, 43(11):1438-1447 (in Chinese).
- [15] LIU H, WANG Z Z, LI C. Numerical simulation analysis for detect-

- ability of spaceborne lidars[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6): 614-617 (in Chinese).
- [16] LU Y M, LUO Z X, CHEN W G, *et al.* Phase space reconstruction for noise of the oceanic lidar[J]. *Laser Technology*, 1998, 22(3): 139-143 (in Chinese).
- [17] YAN Z A, HU X, GUO S Y, *et al.* Performance analysis of spaceborne sodium fluorescence doppler lidar[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(1): 99-105 (in Chinese).
- [18] 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.
- [19] URBAN T J, SCHUTZ B E, AMY L N. A survey of ICESat coastal altimetry applications: continental coast, open ocean island, and inland river[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2008, 19(1): 1-19.
- [20] BEATA M C, ANTON F S, CORNELIS J V, *et al.* Laser altimetry reveals complex pattern of Greenland Ice Sheet dynamics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(52): 18478-18483.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] LIU D, QI F, JIN C J, *et al.* Polarization lidar observations of cirrus clouds and asian dust aerosols over Hefei[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(6): 1093-1100 (in Chinese).
- [24] 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.
- [25] STRAUME-LINDNER A G, INGMAN P, the AEOLUS MISSIONS ADVISORY GROUP. Esa's wind lidar mission and its contribution to numerical weather prediction [C]//European Geosciences Union. European Geosciences Union General Assembly, Munich, Germany; European Geosciences Union, 2010: 3444-3451.
- [26] REITEBUCH O, LEMMERZ C, NAGEL E, *et al.* The airborne demonstrator for the direct-detection doppler wind lidar ALADIN on ADM-Aeolus. Part I: instrument design and comparison to satellite instrument[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* December, 2009, 26(11): 2501-2515.
- [27] REITEBUCH O, LEMMERZ C, NAGEL E, *et al.* The airborne demonstrator for the direct-detection doppler wind lidar ALADIN on ADM-Aeolus. Part II: simulations and rayleigh receiver radiometric performance[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(11): 2516-2530.
- [28] ABREU V J. Wind measurements from an orbital platform using a lidar system with incoherent detection: an analysis[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(17): 2992-2997.
- [29] YU C R, LIU Z S, BI D C, *et al.* Comparison of simulated performance of filters in space-borne wind lidar system[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2013, 30(5): 615-620 (in Chinese).
- [30] LIU Z S, CHEN Z, YU C, *et al.* Doppler wind lidar: from vehicle-mounted to space-borne[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2015, 10(2): 126-138 (in Chinese).
- [31] TANG L, WU H, SUN D, *et al.* Design and calibration of the Fabry-Perot etalon in Rayleigh backscattering Doppler wind lidar[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(2): 283-288 (in Chinese).
- [32] ZHANG L, LIU Z Y, HU Y, *et al.* Improved design of cassegrain optical system[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 34(4): 30-32 (in Chinese).
- [33] CAUREL M, PAQUIN R A, PARSONAGE T B, *et al.* Use of beryllium for the VLT secondary mirror[J]. *Proceedings of the SPIE*, 1996, 2857: 86-98.
- [34] GARDNER J P. Science with the James-Webb space telescope[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2006, 6265: 87-98.
- [35] SEIN E, TOULEMONT Y, SAFA F, *et al.* A 3.5M SiC telescope for HERSCHEL mission[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2003, 4850: 606-618.
- [36] KRABBE A, MEHLERT D, ROSER H P, *et al.* SOFIA, an airborne observatory for infrared astronomy[J]. *European Journal of Physics*, 2013, 34(6): 161-177.