

星载激光测高技术发展现状

于真真^{1,2} 侯霞¹ 周翠芸^{1,2}

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 作为天基系统的重要遥感遥测手段,星载激光高度计具有高精度、高分辨率、垂直分辨等优点,在地形地貌测绘、深空探测、全球预警和监测等方面具有独特的优势,发展前景十分广阔。对星载激光测高技术的发展过程进行了介绍,分别阐述了星载激光高度计及多光束推帚式激光高度计的工作原理,分析了多光束推帚式探测技术中多束激光并行发射、激光器技术和激光回波的阵列探测等关键技术,并介绍了星载激光测高技术的应用情况,最后对空间多光束激光探测技术的发展前景及我国星载激光测高技术的发展进行展望。

关键词 遥感;激光雷达;星载激光高度计;多光束;推帚式

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.020006

Progress and Current State of Space-Borne Laser Altimetry

Yu Zhenzhen^{1,2} Hou Xia¹ Zhou Cuiyun^{1,2}

¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract As an important tool of space-based remote sensing system, space-borne laser altimeter has a lot of advantages, such as high accuracy, high resolution and ability of vertical resolution. So it has unique advantages and bright prospect in topographic mapping, deep-space exploration, global alert and monitoring and so on. The development of space-borne laser altimetry is briefly introduced, and the working principles of space-borne laser altimeter and push-broom laser altimeter using multiple beams are given respectively. For the latter, key technologies are analyzed, such as the transmission technology of multiple laser beams, the laser technology, the array detecting and receiving technology of multiplexing signals and so on. The application of space-borne laser altimetry is also described. Finally, the prospect of space-borne push-broom laser altimetry based on multiple beams is predicted and the development of space-borne laser altimetry in China is presented.

Key words remote sensing; lidar; space-borne laser altimeter; multi-beam; push-broom

OCIS codes 280.3640; 140.3480; 220.4000

1 引言

作为一种主动遥感探测技术和工具,激光雷达是现代雷达探测技术从厘米波、毫米波向光波探测技术的延伸,具有高精度、高时空分辨率及垂直分辨等优点,在三维成像、对地观测和深空探测等领域得到广泛的应用^[1~3]。尤其是近年来,随着激光器技术、光电检测技术和计算机控制技术的发展,机载、星载激光探测技术有了很大的发展^[4~6]。

早在20世纪70年代,美国就开始进行星载激光测距和激光遥感方面的研究,在“阿波罗”系列登月飞船上安装了氙灯抽运固体激光器的激光测距仪^[7]。在20世纪80年代早期,闪光灯抽运的固体激光器作为星载激光测距仪的光源一直处于主导地位。进入90年代后,世界各空间强国都在进行星载激光雷达研究,半

收稿日期: 2012-10-23; 收到修改稿日期: 2012-11-13; 网络出版日期: 2013-01-07

作者简介: 于真真(1987—),女,硕士研究生,主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: yuzhenzhen3076@sina.com

导师简介: 侯霞(1975—),女,研究员,硕士生导师,主要从事固体激光技术、星载激光遥感及激光雷达等方面的研究。

E-mail: hou_xia@siom.ac.cn

导体激光器抽运的全固态激光器(DPSSL)由于寿命长、体积小、质量轻、功耗低等优点开始取代闪光灯抽运的激光器^[8,9],成为空间激光雷达系统的首选发射光源。美国国家航空航天局(NASA)在1996年发射的火星轨道激光高度计(MOLA)所用激光器代表着第一代应用于空间的DPSSL^[10]。之后NASA的地球科学激光测高仪(GLAS)、云-气溶胶激光雷达(CALIOP)、水星激光高度计(MLA)及月球轨道激光高度计(LOLA)^[11~14],我国的嫦娥一号激光高度计等^[15,16]均以DPSSL为发射器光源,结构设计为功率振荡器(PO)或者主振荡功率放大器(MOPA)。目前,以激光二极管(LD)阵列抽运的Nd:YAG板条激光器作为光源的空间激光雷达高度计发展比较成熟,多为低重复频率、高能量、单光束发射、硅雪崩光电二极管(APD)阵列探测系统,沿卫星地面轨迹探测地表轮廓等信息。

随着激光探测技术尤其是精细分光技术、多元阵列探测技术的发展,推帚式激光探测技术日益受到研究人员的关注。其采用具有较高激光功率、脉冲重复频率不太高的激光器,通过激光束分束发射和阵列探测,实现一行多点的瞬时信息获取。基于多光束并行发射系统的星载激光测高仪,其推帚式探测不仅可以实现相较于单光束探测更宽的幅宽,缩短地形地貌测绘的时间,还可以获得有关表面坡度和粗糙度的信息,实现高精度、高分辨率的空间高程测绘,十分有利于空间科学研究。NASA于2009年发射的LOLA是第一个多光束无扫描机构的星载系统^[17]。2007年美国对地十年观测计划中的“冰、云和陆地高程”卫星-2(ICESat-2)和“地表变形、生态系统结构和动力学”卫星(DES DynI)及“激光雷达地表地形测绘”(LIST)的激光高度计均为多光束推帚式探测设计^[18~21],其中微脉冲、高重复频率、多光束、单光子探测系统代表着新一代星载激光测绘系统。

2 星载激光高度计探测原理

星载激光高度计是天基目标跟踪测量系统的重要组成部分,典型的星载激光高度计主要由发射子系统、接收子系统和位置姿态子系统3部分组成。从本质上来说,激光高度计技术是从激光测距中演化来的,其基本工作原理是:安装在低轨卫星或大型空间平台上的激光器持续向探测空间发射功率为 P_0 的激光脉冲,激光光束穿越大气或真空后经目标散射的微弱后向散射回波由接收子系统中望远镜接收,通过光电探测器件转换成电脉冲回波,分析该电脉冲回波的渡越时间 ΔT 来确定卫星到探测目标之间的距离 R ^[22,23]。图1为根据激光脉冲的渡越时间测距的原理图,距离 $R = c \cdot \frac{\Delta T}{2}$,其中 $c = 299\,792\,458$ m/s为真空中的光速。然后根据星体的几何半径、卫星的轨道高度以及仪器的指向角来确定激光脚印内星体表面的地形高度。激光脚印内的表面高度可写为

$$h = [R_s^2 + R^2 - 2RR_s \cos \phi]^{1/2} - R_{\text{ref}}, \quad (1)$$

式中 R_s 为卫星轨道半径(m), ϕ 为参照最低点的指示角(rad), R_{ref} 是星体参考半径(m),通常作为测量的基准面^[24]。对一片区域测量出大量数据后,就可以形成地形地貌的数字高度模型。

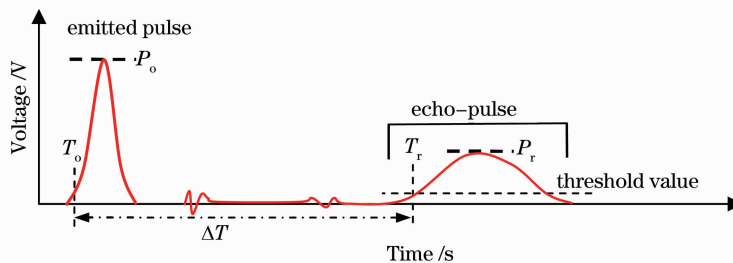


图1 由渡越时间测距原理图^[23]

Fig. 1 Schematic of the time-of-flight measurement of a laser range finder^[23]

高度计发出的激光脉冲有一定的光斑大小,激光照射到平坦的表面上,其光斑大小可表示为 $D = 2Z \cdot \tan \theta$,其中 Z 为沿激光束中心高度计到照射表面的距离(m), θ 为激光发散角(rad)^[24]。由于激光高度计到待测目标表面通常为几十到几百千米,即使发散角较小,激光在目标表面光斑也很大,例如 $Z = 400$ km, $\theta = 0.5$ mrad,则 $D = 400$ m。而激光测距误差与光斑尺寸成正比,如此大的激光光斑对测距精度是有影响的,减

小激光发散角可提高测距精度,所以激光发射系统常采用望远镜系统对激光扩束来减小光束发散角。

通过探测激光回波携带的目标反射强度信息及波形特征等,可以获得激光足迹光斑内更多有用的信息。采用激光高度计方程可以从探测到的回波脉冲能量确定目标表面表观反射率,回波脉冲能量为

$$E_r = \frac{E_t S_r T_r \rho \sigma_a \cos^2 \theta}{\pi R^2}, \quad (2)$$

式中 E_r 为回波脉冲能量(J), E_t 为发射的激光脉冲能量(J), S_r 为接收系统望远镜的口径面积(m^2), T_r 为接收光学系统透射率, ρ 为目标表面表观反射率, σ_a 为在探测空间激光的单程透射率, θ 为发射激光与目标法线的夹角(rad)^[24]。利用回波信号强度二维分布信息和目标距离信息可以获得目标的三维立体像,实现测绘的功能。图2为激光雷达用于分析植被冠层的三维结构时,激光回波脉冲与植被轮廓高度的关系示意图^[22]。较早的回波为高处树冠的回波,最后的回波为地面回波,通过对回波进行分析与判别,得到植被冠层结构。

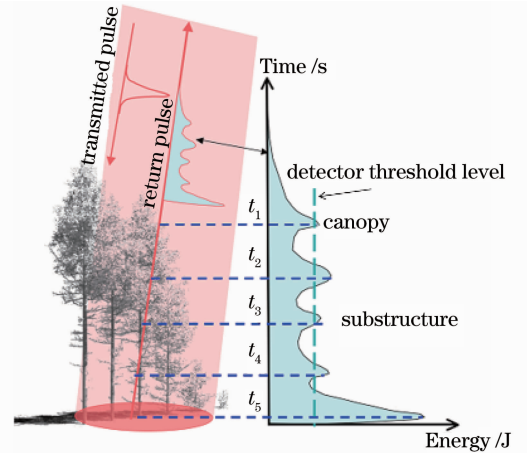


图2 光回波与植被轮廓高度的关系^[22]

Fig. 2 Relation of a return pulse and vegetation structure heights^[22]

3 多光束星载激光雷达探测技术

应用于空间科学研究的激光雷达,一般由于作用距离比较远,发射系统只能采用脉冲激光源。在扫描方式下,若激光器重复频率足够高,可以实现高密度、高覆盖率的目标采样。目前机载扫描式激光高度计发展比较成熟,表现出高精度、高分辨率的探测能力。但是高功率脉冲激光器的重复频率不可能做得非常高,而且扫描机构会增加系统质量、体积、能耗等,使得扫描式探测技术难以在星载激光雷达系统中得以运用。随着技术的不断进步,基于多路激光并行发射和阵列接收的推帚式激光雷达多元阵列探测技术正成为国内外研究的热点,是一种颇具优势和潜能的探测技术。图3为推帚式星载激光雷达探测示意图^[25],其利用卫星沿轨方向的飞行带动多光束发射及阵列接收系统实现交轨方向一行多点的宽幅探测。

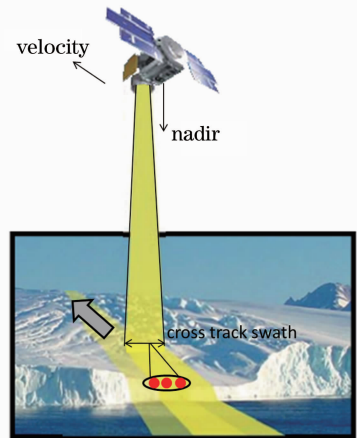


图3 推帚式星载激光高度计示意图^[25]

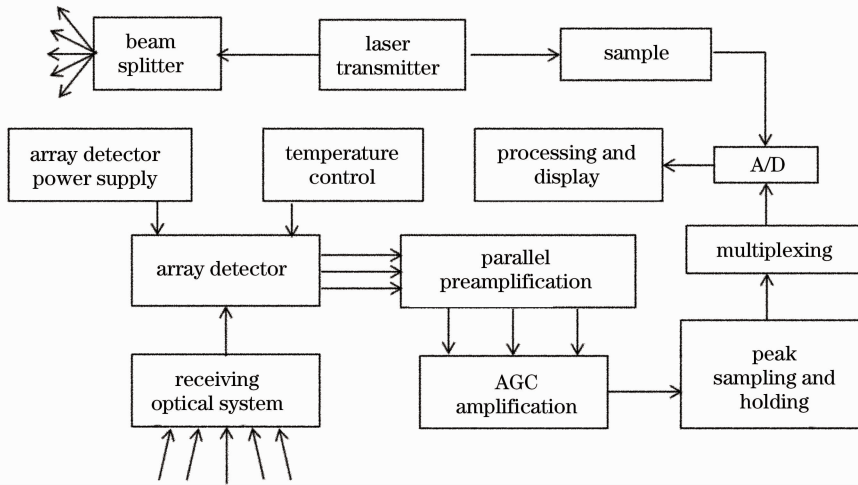
Fig. 3 Measurement concept of space-based push-broom laser altimeter^[25]

激光雷达多元阵列探测的工作原理如图4所示,激光发射系统发射的阵列激光经目标反射后由接收光学系统接收进入探测器阵列,由其转换为电信号,经过增益可控(AGC)的放大器输入到采样保持电路中进行峰值采样,采样后的信号,经过多路复用器送入模数转换(A/D)模块进行转换,同时激光发射时的主波信号也被送入A/D模块,最终此模块的输出进入处理和显示模块,从而得到测距结果,结合其他参数,可以得到目标的三维图像^[26]。这种新的探测方法将对激光器技术、分光技术、阵列探测技术及回波信号的处理技术等提出新的要求。

3.1 激光并行发射技术

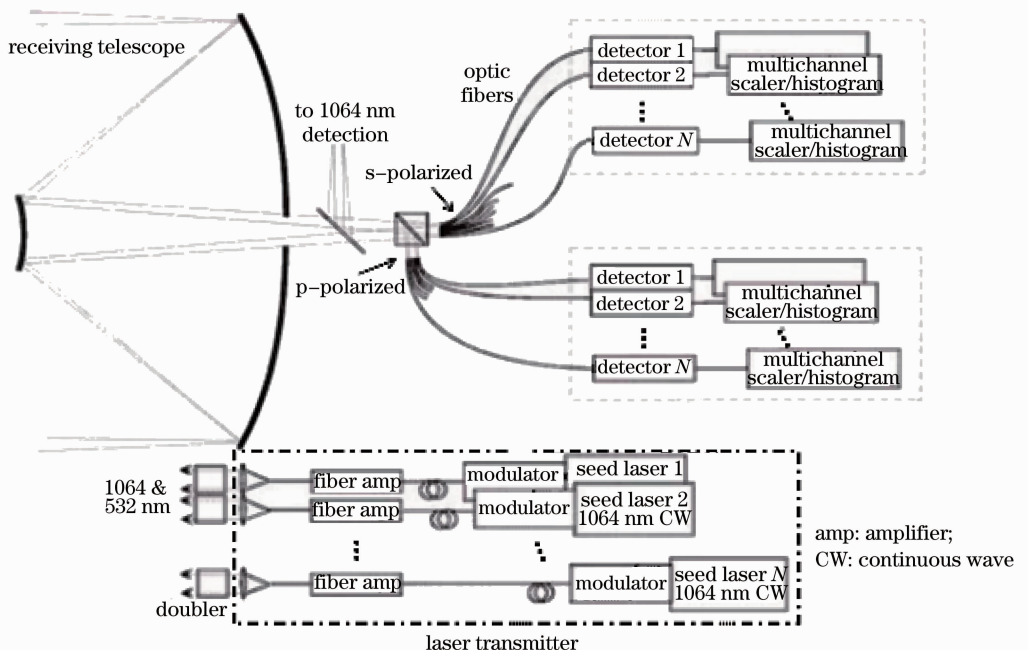
3.1.1 多光束发射的实现

激光的多束并行发射可采用激光器阵列或利用分束元件对激光器的输出分束实现^[26,27]。对于要求更多光束以实现更宽幅测绘的雷达系统,可以对多台激光器进行分束,如目前LIST任务中多光束方案的设计。这种激光发射端采用与探测器阵列相匹配的多束激光发射,还可提高激光能量的利用率,增大激光雷达的探测距离。

图 4 激光雷达多元阵列探测原理框图^[26]Fig. 4 Block diagram of multi-element array detection of lidar^[26]

利用激光器阵列实现多光束,可通过光纤激光器阵列,或直接通过半导体二极管阵列。DESDynI 中激光雷达多光束探测设计为卫星搭载 5 台 LD 阵列抽运的功率振荡器^[28]。近年来光纤激光技术的不断发展和成熟使得光纤激光器作为未来星载激光辐射源成为可能,其结构紧凑,体积小,效率高,且全光纤的设计趋势使得它能适应各种复杂的空间环境,具有传统激光器无法比拟的优势,但目前脉冲光纤激光器、光纤放大器的输出功率不及 DPSSL,需由单光子探测器探测回波。图 5 为采用多个光纤激光器单光子计数式探测的激光高度计工作示意图^[25]。对于半导体二极管阵列,其体积小、效率高、稳定性好及可内调制等优点使其具有星载激光光源的潜力,但其在保证高光束质量的同时输出功率不高,且在直接调制时出现波长啁啾现象。此外,激光器阵列的方法不易做到激光的同步输出,即使采用同一个触发源,由于各激光器的响应时间不同,也会出现不同的出光时间,导致各通道的距离测量存在偏差。

采用分束元件将一台激光器输出的激光分束成所需要的图样,可做到激光同步输出。但是并行分束发射装置的设计比较复杂,需要扩束系统、聚焦透镜、发射透镜等,且为满足探测需求通常要求分束前激光能量

图 5 光纤激光器阵列光子计数式激光高度计^[25]Fig. 5 Photon counting laser altimeter using multiple fiber lasers^[25]

足够高。通过微光学阵列技术或者二元光学技术制作的微光学阵列发生器有 4 种基本形式^[29],如图 6 所示。图 6(a)为微透镜阵列 (MLA) 成像,入射平面波经 $M \times N$ 的 MLA 后就获得 $M \times N$ 个阵列光束。图 6(b)为菲涅耳阵列发生器,直接利用相位光栅的近场衍射产生阵列像,为无透镜成像。图 6(c)为傅里叶阵列发生器,利用特种光栅(例如达曼光栅)的远场衍射产生光强分布均匀的点阵。图 6(d)为级联式阵列,可利用光纤分束器、光波导分束器等光分束器来逐次分束,形成阵列光束。

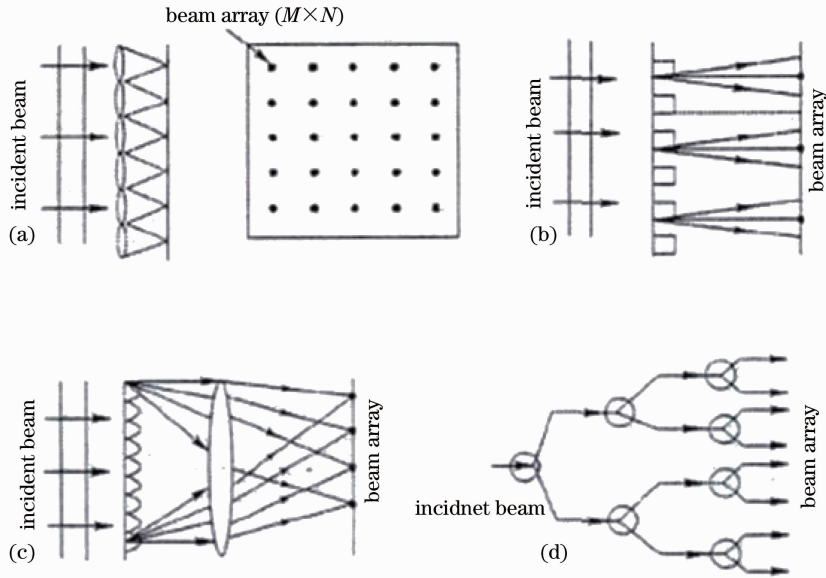


图 6 微光学阵列的基本形式^[29]

Fig. 6 Basic forms of micro optics array^[29]

常用的激光分束元件主要有衍射光学元件 (DOE)、级联式光纤阵列、反射镜组、棱镜等^[26,27]。以 DOE 作为分束元件的机载推帚式激光三维成像技术的发展为推帚式星载激光测绘技术提供了借鉴^[1,30~32]。单激光束通过 DOE 分为若干束,同时使用阵列探测器测量每个后向散射光束高程的方法已在 LOLA 中采用^[14]。此外,NASA 的 LIST 项目目前设计为搭载 10 台 MOPA 激光器,每台激光器通过 DOE 分为 100 束激光来得到 1000 束脚印为 5 m 的光束,实现幅宽 5 km 的探测。DOE 分束原理如图 7 所示,通过改变入射光的相位实现所期望的远场光斑,所以 DOE 又被称为相位光栅,光栅方程为

$\sin \theta_m^i = \frac{m}{\Lambda} \lambda$,其中 λ 为入射光的波长 (μm), $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 为衍射光级次, Λ 为光栅周期 (μm), θ_m^i 为第 m 级衍射光与光栅法线夹角 (rad)^[33]。DOE 是在特定透明材料表面蚀刻微米级深度的特定形状而形成的,通常蚀刻深度为 $d = \frac{\lambda}{n-1}$,其中 n 为材料折射率。因其结构通常具有周期性,可以通过傅里叶分析进行模拟来分析 DOE 分束的性能。DOE 主要参数为分束效率、各光束能量均匀性及各光束与入射光束的光束质量的一致性。此外,空间应用 DOE 需要分光效率高、重量轻、坚固以及符合空间环境使用要求等。

3.1.2 激光器技术

固体激光器由于具有能量大、峰值功率高、结构紧凑等优点,很适合在测量距离较远的星载激光高度计中应用。为实现高精度、宽幅测绘,推帚式激光雷达高度计将对星载激光器的输出功率、光束质量、电插拔及光-光效率、体积、重量等有更高的要求。如 LIST 系统要求激光器的电插拔效率至少大于 15%。对地观测时,低轨卫星速度一般为 4~8 km/s,激光脚印为 5~20 m 时,为实现沿轨方向连续测绘要求激光器重复频

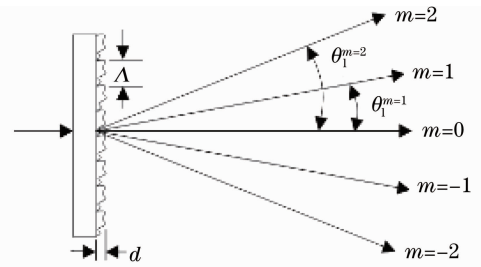


图 7 DOE 的光束分束原理^[33]

Fig. 7 Sketch of beam splitting with DOE^[33]

率为 0.2~2.0 kHz^[27]。目前已成功运行的星载激光高度计均采用低重复频率(百赫兹以内)、高能量的准连续(QCW)LD 阵列抽运的全固态激光器。因此激光器技术发展的重点是进一步减小体积和功耗,采用更先进的调 Q 或锁模方式减小脉冲宽度,采用先进的 LD 抽运技术提高发射脉冲的发射频率等^[34]。未来的星载测绘任务中,微脉冲、高重复频率、光子计数式探测的方式将成为下一代星载激光高度计的选择,激光器的抽运方式有望采用连续 LD。

板条激光器及放大器是目前星载激光雷达系统应用最广泛、最成熟的技术。但由于抽运光与信号光模式匹配不佳,板条放大器难以实现更高的效率。此外,高功率情况下的热问题导致其激光模式变差。目前具有星载应用潜力的激光振荡器有微片激光器、光纤激光器、半导体激光器等,功率放大器有薄片放大器、平面波导放大器、光子晶体光纤放大器、半导体放大器等。通过以上激光器及放大器的组合实现 MOPA 结构的激光器,在得到高脉冲能量的同时又可以保持高光束质量,以满足空间探测的需求。图 8 为 ICESat-2 搭载激光高度计(ATLAS)的激光器设计中采用的 MOPA 结构方案^[35]。

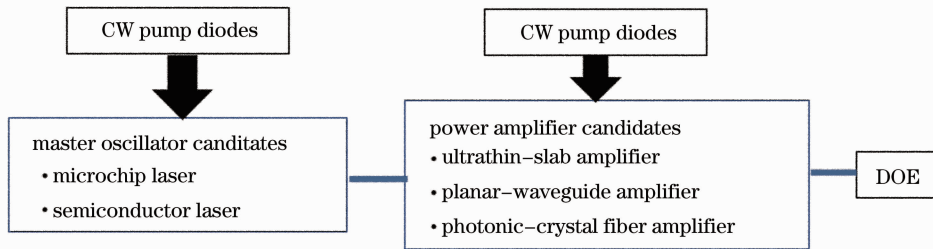


图 8 ATLAS MOPA 激光器设计^[35]

Fig. 8 MOPA laser architecture for ATLAS^[35]

LD 抽运的微片激光器具有全固化、体积小、结构紧凑、较高转换效率等优点,其腔长较短,容易获得高重复频率、峰值功率数百瓦、单脉冲能量微焦耳量级的调 Q 纳秒脉冲,其激光介质主要有 Nd:YAG、Nd:YVO₄、Yb:YAG 等。平面波导激光器及放大器在慢轴方向具有板条状激光介质高增益、大散热面积等优点,快轴方向的波导结构可保持良好的激光模式,具有高光束质量、千瓦级高效功率输出的潜力,目前对平面波导激光器的研究比较多,其作为放大器方面的研究较少。电插拔效率大于 15% 的 Yb:YAG MOPA 激光器已有报道,其主振荡器为 Yb:YAG 微片激光器,功率放大器采用 Yb:YAG 平面波导放大器,波长为 1030 nm,单脉冲能量为 1.6 mJ,重复频率为 10 kHz^[36]。

3.2 多路信号探测接收技术

多路激光回波并行接收技术就是在激光回波接收系统中采用光学和电子学的方式对多路激光光束回波的并行接收及高速处理^[37]。随着探测技术的不断进步,线阵、面阵等阵列探测接收多路信号技术已成为目前的发展方向。

硅 APD 是目前工作在 1064nm 波长的灵敏度较高、具有内部增益的光电器件,具有响应度高、响应速度快等特点,在星载激光高度计探测器方面占主导地位,但是硅探测器的暗电流限制了其探测灵敏度。探测器量子效率的提高可降低系统对激光器能量的要求,从而降低星载系统的质量、功耗、体积等,极大地提高激光器及系统的稳定性。因此进一步提高空间应用的近红外探测器的响应度、灵敏度的研究将对星载系统整体性能的稳定十分有利。美国 NASA 戈达德太空飞行中心(GSFC)在此方面做了很多研究工作,包括 InGaAs、InAlAs、InGaAsP、HgCdTe 及谐振腔增强型 Si 的 APD 阵列,InGaAs 或者 InGaAsP 的光电倍增管。其通过测量探测器的量子效率、噪声因子、时间抖动性等对探测器的性能进行了实验比较^[38~40],选择具有空间应用潜力的阵列探测器。

对阵列探测器,若接收端光敏面积小于像素面积,入射光的一部分照射到光敏面之间的死区中,会产生反射、散射,在探测器中形成有害辐照。因此接收端光学系统常采用两种方式将入射光聚焦到光敏面以内,提高探测器的灵敏度。一种是制作与探测器像素尺寸匹配的微透镜阵列,将入射光能全部收集到探测器光敏面上;另一种是采用光纤束进行光学转换,每一根光纤对应一个敏感单元,完成阵列探测^[26,41]。图 5 所示激光高度计的接收部分便采用了光纤阵列。多路信号并行接收的方法主要有两种:1)采用单元器件的线阵

化或者面阵化,将传统的单点激光回波探测电路组合成为与出射采样图案匹配的线阵或者面阵电路,对于元数较少的系统,这是一种简单高效的方法。2)采用线阵电路,作为多元阵列探测的关键技术之一,使用 APD 阵列探测器接收回波信号达到推帚式扫描效果的方式是目前发展比较快的探测技术^[37]。由于 APD 阵列探测器雪崩管的增益会随着温度的变化而改变,因此需要对雪崩管阵列的偏压进行温度补偿。同时为了抑制外界背景噪声,可能会加入噪控电路对其偏压进行控制。为了使激光雷达系统获得较高的探测概率,基于 APD 阵列的非扫描激光雷达系统可运用多脉冲积累探测技术来提高系统信噪比^[42]。

由激光测距方程,提高雷达作用距离可以通过提高激光器发射能量实现。但回波能量与距离的二次方成正比,完全通过提高激光发射能量来增加作用距离是不现实的,对推帚式星载激光雷达而言尤其如此。在提高探测器增益方面,由于受限于半导体制造技术,APD 的增益难以提高。近年来一个发展方向是采用具备单光子探测能力的面阵探测器来提高测绘效率和作用距离,同时可降低对激光器输出能量的要求,进而降低系统的总体功耗。工作在线性模式的 APD 是激光雷达中最常用的光探测器,其最小可探测光功率通常在纳瓦量级。工作在盖革模式下的 APD 具备单光子探测的能力,能够探测到极微弱的回波信号,实现低功率下的远程测距。APD 的光电倍增因子 M 可表示为 $M = \frac{1}{[1 - (V/V_B)]^\alpha}$, 其中 V 为外加偏置电压(V), V_B 为击穿电压(V), α 为与基质材料有关的系数。可以看出,当 V 接近 V_B 时, M 迅速增大,而当 $V = V_B$ 时, M 趋于无穷,此时 APD 工作在盖革模式下^[43,44]。光子计数式探测时,外界背景噪声及 APD 本身随机产生的暗计数会被误判为激光回波信号,需要设计合适的数据滤波算法来消除。图 9 为对回波信号进行脉冲模拟信号探测和光子计数探测方式的对比^[45]。二者看起来相似,但所包含的信息不同,而且对数据的处理方式也不同。

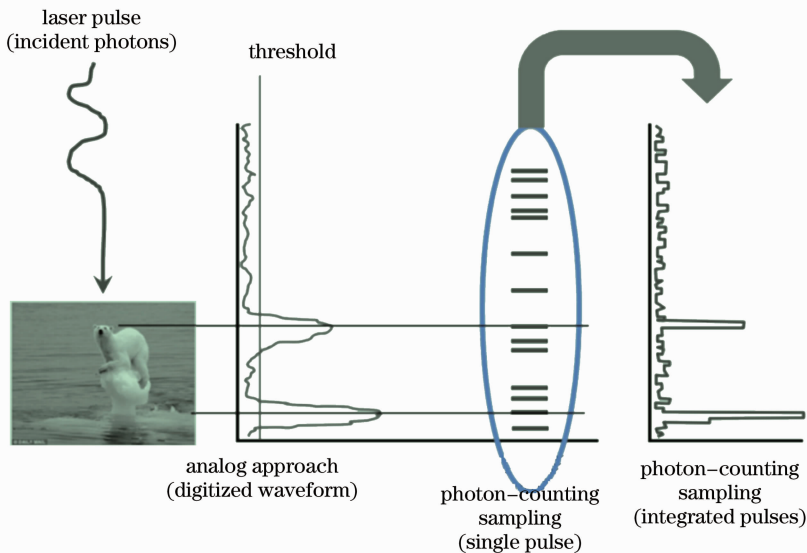


图 9 模拟探测与光子计数探测方式的对比^[45]

Fig. 9 Comparison between analog detection and photon-counting detection^[45]

4 星载激光高度计的主要应用

星载激光高度计采用卫星平台,运行轨道高,观测范围广,具有观察整个天体的能力,能全天时对地观测,受外界背景干扰小,且具有高分辨率和高灵敏度等特点,在地形地貌测绘、深空探测、全球预警和监测等方面具有独特的优势,成为空间领域应用的利器。

地形、地貌测绘是激光高度计最为常见、应用比较成熟的领域。火星和月球等探测计划中都应用了激光雷达高度计,这有助于制作这些天体的综合地形图,高精度地获取天体表面地形特征的高程信息,为未来进行登陆探测的着陆点选择提供依据。这些探测器不仅可以提供所测星体的地貌,还能为星体地质和物理科学等研究提供更多宝贵的资料,如表面反射率季节变化、大气结构等。火星地形地貌早已成功地由 MOLA

激光高度计获得,其探测的主要目的是确定火星球体的外貌、研究火星表面反射率特征、分析球体表面的矿物学分布及反射率的季节变化,为大气循环方面的研究提供必要支持,并为将来火星探测者的着陆地点选择提供测地学和地形学上的评估^[5]。应用于月球三维地形地貌测绘的 LOLA 激光高度计,用于形成高精度月球表面地形模型和月球大地坐标框架,对探测器在月面选择安全着陆点以及漫游器在月面的安全移动、自身定位等工作都具有重要意义^[6]。NASA 预计于 2016~2020 年发射的 LIST 测绘卫星的任务是在 3 年之内提供地表 5 m 空间分辨率、10 cm 垂直分辨率的全球高分辨率地形,以及地表植被、水、雪和冰层的高度等^[21]。

极地冰盖、海冰动态变化是极地科学研究中重要主题之一,在很大程度上影响着全球气候和海平面变化。NASA 在 2003 年发射的 ICESat 卫星搭载的 GLAS 是第一个用于连续全球观测的星载激光高度计,主要观测南极洲和格陵兰冰盖的高程变化,用以研究冰盖变化与极地气候间的响应,评估极地冰雪变化对全球海平面变化的影响。它能精确测量冰面特征和冰层厚度,制作较大比例尺的冰盖拓扑图^[5]。NASA 拟于 2016 年发射的 ICESat-2 作为 ICESat 后续卫星,继续执行测量冰盖变化及海冰厚度的任务,提供近似三维的观测,空间覆盖面积将是 ICESat 的三倍以上。其搭载的 ATLAS 激光高度计为微脉冲、多光束、光子计数式系统,增加交轨采样密度,在轨道基础上解决表面坡度问题,高重复频率增加了沿轨采样密度,使光子计数探测器捕捉每个重复光斑的成功率达到 80%^[46]。

星载激光雷达发射的激光脉冲能部分地穿透植被冠层,通过回波波形数据可以分析出整个植被冠层的三维结构和冠层下地表的情况,可以测量和估算树木高度、冠层结构等参数,从而估算森林生物量,为其他林业研究提供基础数据。GLAS 星载激光高度计除了测量冰盖地形、监测云层和大气的特征外,另一个重要的应用领域便是对林业资源的调查,特别是通过测量树冠高度估算森林生物量。其 91 天持续观测的结果表明,除陆地表面观测的最低点外,空间精度可以达到每千米误差小于 3 m,采用如此抽样方式,结合 50 m 或更小的光斑,可以获得高分辨率的植被结构,从而提供一个全球生态系统应用的新手段^[46]。

5 结束语

近年来,激光探测技术的迅猛发展体现了它所具有的独特潜力。随着社会各领域对高精度探测需求的日益增长,未来星载测绘任务将向着高空间分辨率(小的激光脚印)、高垂直分辨率、高测绘效率等方向发展。微脉冲、高重复频率、多光束、单光子探测系统作为获取三维高程和垂直结构信息非常有效且精确的手段,代表着新一代星载激光测高系统,将成为未来空间激光探测技术的发展方向之一。

我国早在 20 世纪 80 年代就开始了激光雷达的研究。机载激光探测方面,中国测绘科学研究院、武汉大学和中国科学院光电研究院等许多研究机构都已经开展了大量的研究工作,并取得了一定的成绩,为机载激光雷达的进一步发展和应用及对星载设备的研究奠定了基础。我国第一次自行研制的空间应用的主动遥感仪器“嫦娥一号”卫星激光高度计已于 2007 年成功发射。三维激光雷达探测技术方面,在国家 863 计划支持下,首次实现了机载推帚式激光扫描三维成像系统。为加快我国激光雷达技术的发展,科技部在国家 863 计划中相继布置了有关星载激光雷达系统的预研课题。由于特殊的空间运行环境,星载激光系统对其各分系统的设计有着更高的要求,例如对激光器脉宽、重复频率、功耗、寿命等都有一系列特殊要求,光电阵列探测器件的高灵敏度和低噪声的要求,回波信号的高速采样、存储和传输等。只有深入研究和突破星载激光雷达的关键技术,实现各单元技术的突破和系统整体的集成,才能真正促进我国星载激光测高技术的发展。

参 考 文 献

- 1 He Min, Hu Yihua, Zhao Nanxiang *et al.*. Application of airborne three-dimensional laser imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(4): 43~49
贺敏, 胡以华, 赵楠翔等. 机载激光三维成像技术应用现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(4): 43~49
- 2 Hu Yihua, Shu Rong. Airborne and space borne laser sounding technology and application [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(s3): 8~13
胡以华, 舒嵘. 机载与星载激光探测技术及其应用[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(s3): 8~13
- 3 Li Ran, Wang Cheng, Su Guozhong *et al.*. Development and application of spaceborne lidar [J]. *Science & Technology*

- Review, 2007, **25**(14): 58~63
- 李 然, 王 成, 苏国中等. 星载激光雷达的发展与应用[J]. 科技导报, 2007, **25**(14): 58~63
- 4 Li Lei, Hu Yihua, Zhao Nangxiang *et al.*. Application of the three-dimensional laser imaging technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(12): 66~71
- 李 磊, 胡以华, 赵楠翔等. 激光三维成像技术应用现状[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(12): 66~71
- 5 Xu Chunxiao, Zhou Feng. Development and applications of space-borne laser remote sensing technology[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009, **30**(4): 26~31
- 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
- 6 Geng Lin, Zhang Zhongping. Foreign spaceborne laser application[J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(9): 919~925
- 耿 林, 张忠萍. 国外空间激光应用技术研究进展[J]. 激光与红外, 2010, **40**(9): 919~925
- 7 J. L. Bufton, J. B. Blair. Space laser altimetry: laser engineering for multi-beam applications[J]. *Rev. Laser Eng.*, 1996, **24**(12): 1285~1292
- 8 R. J. Smith, R. R. Rice, L. B. Allen, Jr.. 100 mW laser diode pumped Nd:YAG laser[C]. *SPIE*, 1980, **247**: 144~148
- 9 R. S. Afzal. Diode-pumped solid state lasers for space-based applications[C]. AIP Conf. Proc., 1998, **420**: 107~111
- 10 R. S. Afzal. Mars observer laser altimeter: laser transmitter[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(15): 3184~3188
- 11 R. S. Afzal, A. W. Yu, J. L. Dallas *et al.*. The Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) Laser Transmitter[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 511~536
- 12 D. Winker, C. Hostetler, W. Hunt. CALIOP: the CALIPSO lidar[C]. 22nd International Laser Radar Conference, 2004, 941~944
- 13 D. J. Krebs, A. M. Novo-Gradac, X. L. Sun *et al.*. Compact, passively Q-switched Nd:YAG laser for the MESSENGER mission to Mercury[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(9): 1715~1718
- 14 A. W. Yu, M. A. Novo-Gradac, G. B. Shaw *et al.*. Laser transmitter for the lunar orbit laser altimeter (LOLA) instrument[C]. CLEO, 2008. CMQ2
- 15 Wang Jianyu, Shu Rong, Chen Weibiao *et al.*. The Chang'E-1 orbiter [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2010, **40**(8): 1063~1070
- 王建宇, 舒 嵘, 陈卫标等. 嫦娥一号卫星载激光高度计[J]. 中国科学:物理学力学天文学, 2010, **40**(8): 1063~1070
- 16 A. W. Yu, X. L. Sun, G. B. Shaw *et al.*. Overview of space qualified solid-state lasers development at NASA Goddard Space Flight Center[C]. *SPIE*, 2009, **7193**: 719305
- 17 A. W. Yu, G. B. Shaw, A. M. Novo-Gradac *et al.*. In space performance of the lunar orbiter laser altimeter (LOLA) laser transmitter[C]. *SPIE*, 2011, **8182**: 818208
- 18 W. Abdalati, H. J. Zwally, R. Bindshadler *et al.*. The ICESat-2 laser altimetry mission[J]. *Proc. IEEE*, 2010, **98**(5): 735~751
- 19 A. Donnellan, P. Rosen, J. Graf *et al.*. Deformation, ecosystem Structure, and Dynamics of Ice (DESDynI)[C]. 2008 IEEE, 2008 Aerospace Conference. 1~13
- 20 A. W. Yu, M. A. Krainak, D. J. Harding *et al.*. A Spaceborne Lidar for High-Resolution Topographic Mapping of the Earth's Surface[OL]. SPIE Newsroom, <http://spie.org/x39305.xml>, March 1, 2010
- 21 A. W. Yu, M. A. Krainak, D. J. Harding *et al.*. Spaceborne laser instruments for high-resolution mapping[C]. *SPIE*, 2010, **7578**: 757802
- 22 Li Song. Recent progress of spaceborne laser altimeter system[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, **2**(6): 4~6
- 李 松. 星载激光测高仪发展现状综述[J]. 光学与光电技术, 2004, **2**(6): 4~6
- 23 J. Y. Wang, R. Shu, G. H. Huang *et al.*. Spaceborne laser rangefinder ranging sensitivity and accuracy analysis[C]. *SPIE*, 2010, **7807**: 78070Y
- 24 Xu Daisheng, Huang Genghua, Shu Rong *et al.*. Overall performance analysis of spaceborne laser altimeter[J]. *Infrared*, 2005, (1): 1~8
- 徐代升, 黄庚华, 舒 嵘等. 星载激光高度计综合性能分析[J]. 红外, 2005, (1): 1~8
- 25 J. B. Abshire, D. J. Harding, X. L. Sun *et al.*. Pushbroom laser altimetry using fiber lasers and photon counting detectors[C]. CLEO, 2007. CThII 1
- 26 Li Fan, Wu Shuangyang, Yang Hongguo *et al.*. Multi-element array detecting technology of lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(2): 295~299
- 李 番, 邬双阳, 杨红果等. 激光雷达多元阵列探测技术[J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(2): 295~299
- 27 Sun Zhihui, Deng Jiahao, Wang Chang. Linear array detection mode of three-dimensional imaging laser radar[J]. *Laser &*

- Infrared*, 2011, **41**(4): 381~385
孙志慧, 邓甲昊, 王 昌. 三维成像激光雷达线阵探测模式分析[J]. 激光与红外, 2011, **41**(4): 381~385
- 28 A. W. Yu, M. A. Krainak, D. J. Harding *et al.*. Topographic mapping from space[C]. *SPIE*, 2009, **7467**: 746702
- 29 Leng Xuelian. Research on Optical System Performance of Non-Scanning Pulsed Lidar [D]. Harbin: Heilongjiang University, 2011. 19~21
冷雪莲. 非扫描脉冲激光雷达的光学系统性能研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2011. 19~21
- 30 D. Harding, J. Abshire, P. Dabney *et al.*. The swath imaging multi-polarization photon-counting lidar (SIMPL): a spaceflight prototype[C]. 2008 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, 2008
- 31 D. Harding, P. Dabney, J. Abshire *et al.*. The slope imaging multi-polarization photon-counting lidar: an advanced technology airborne laser altimeter[C]. NASA Earth Science Technology Forum, 2010
- 32 A. W. Yu, M. A. Krainak, D. J. Harding *et al.*. Development effort of the airborne lidar simulator for the lidar surface topography (LIST) mission[C]. *SPIE*, 2011, **8182**: 818207
- 33 J. G. Smith, L. Ramos-Izquierdo, A. Stockham *et al.*. Diffractive optics for moon topography mapping[C]. *SPIE*, 2006, **6223**: 622304
- 34 Zhang Yifei, Yang Hui. The technology and application of laser altimeter[J]. *Aerospace China*, 2007, (12): 19~23
张翼飞, 杨 辉. 激光高度计技术及其应用[J]. 中国航天, 2007, (12): 19~23
- 35 A. W. Yu, M. A. Stephen, S. X. Li *et al.*. Space laser transmitter development for ICESat-2 Mission[C]. *SPIE*, 2010, **7578**: 757809
- 36 A. W. Yu, A. Betin, M. A. Krainak *et al.*. Highly efficient Yb:YAG master oscillator power amplifier laser transmitter for future space flight missions[C]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2012. AW4A
- 37 Chen Yuwei, Zhang Li, Hu Yihua *et al.*. Array detection technology of echo on earth observation laser imager[J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2004, **23**(3): 169~171
陈育伟, 张 立, 胡以华 等. 对地观测激光成像的回波阵列探测技术[J]. 红外与毫米波学报, 2004, **23**(3): 169~171
- 38 M. A. Krainak, X. L. Sun, W. Hasselbrack *et al.*. Near-infrared single-photon-counting detectors for free-space laser receivers[C]. *Single-Photon Workshop 2007*, 2007
- 39 M. A. Krainak, X. L. Sun, G. N. Yang *et al.*. Infrared detectors for spaceborne laser receivers[C]. *SPIE*, 2010, **7808**: 78080B
- 40 M. A. Krainak. Candidate Detectors for Space-Qualified Time-Resolved Photon Counting[OL]. <http://ridl.cfd.rit.edu/products/talks/DVW/Michael%20Krainak/NASA%20photon%20count.pdf>, April 23, 2012
- 41 Du Chunlei, Lin Xiangdi, Zhou Lishu *et al.*. Method for improving performance of infrared detector by micro-optical lens array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(2): 246~249
杜春雷, 林祥棣, 周礼书 等. 微透镜阵列提高红外探测器探测能力的方法研究[J]. 光学学报, 2001, **21**(2): 246~249
- 42 Gao Feng, Yang Jinhua, Jiang Chenghao *et al.*. SNR analysis under multi pulse accumulation of non-scanning lidar system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(5): 051401
高 峰, 杨进华, 姜成昊 等. 非扫描激光雷达系统的多脉冲积累信噪比分析[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(5): 051401
- 43 Kou Songfeng, Chen Qian, Gu Guohua *et al.*. Laser ranging system based on 4-element APD arrays [J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(6): 537~540
寇松峰, 陈 钱, 顾国华 等. 基于4元APD阵列的激光测距技术研究[J]. 激光与红外, 2008, **38**(6): 537~540
- 44 Zhao Mingjun, Zhang Xiaopeng, Zhou Shengli *et al.*. Study on the space-borne laser remote sensing technology [J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(1): 21~24
赵铭军, 张晓鹏, 周胜利 等. 空间激光遥感技术研究[J]. 激光与红外, 2009, **39**(1): 21~24
- 45 C. Birkett. The ICESat-2 Mission Laser Altimetry of Ice, Clouds and Land Elevation... and Also Ocean, Coastal, and Continental Waters[OL]. http://www.avisio.oceanobs.com/fileadmin/documents/OSTST/2011/oral/03_Friday/Plenary/New%20Frontiers/07%20Birkett.ICESat2.pdf, February 21, 2011
- 46 Yang Fan, Wen Jiahong, Wang Weili. ICESAT and ICESAT-2 applications; progress and prospect [J]. *Chinese J. Polar Research*, 2011, **23**(2): 138~148
杨帆, 温家洪, Wang Weili. ICESat 与 ICESat-2 应用进展与展望[J]. 极地研究, 2011, **23**(2): 138~148