

星载激光雷达的发展与应用

李 然¹, 王 成², 苏国中², 张珂殊², 唐伶俐¹, 李传荣²

1. 中国科学院遥感卫星地面站, 北京 100086
2. 中国科学院光电研究院, 北京 100080

[摘要] 简要介绍了激光雷达的原理和发展过程, 并对国外主要星载激光雷达系统(MOLA, GLAS等)的技术参数和科学目标等进行了详细的叙述, 总结了星载激光雷达在各领域中的应用情况, 最后指出了现阶段我国发展星载激光雷达的可能性和必要性。

[关键词] 星载激光雷达; 系统参数; 高程测量; 环境监测

[中图分类号] TN958.98

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)14-0058-06

Development and Applications of Spaceborne LiDAR

LI Ran¹, WANG Cheng², SU Guozhong², ZHANG Keshu², TANG Lingli¹, LI Chuanrong²

1. China Remote Sensing Satellite Ground Station, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China
2. Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract: In this paper, the basic principle and development of LiDAR remote sensing technique are introduced briefly, and a comprehensive description of the technical parameters and science targets of main overseas spaceborne LiDAR system is given. The applications of spaceborne LiDAR in many spheres of the science are reviewed in detail. Finally, it is pointed out the possibility and necessity of developing the spaceborne LiDAR at the present stage.

Key Words: spaceborne LiDAR; system parameters; altimetry; environmental monitoring

CLC Number: TN958.98

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)14-0058-06

0 引言

激光雷达(Light Detection And Ranging, LiDAR)是一种可以精确、快速地获取地面或大气三维空间信息的主动探测技术, 应用范围和发展前景十分广阔。以往的传感器只能获取目标的空间平面信息, 需要通过同轨、异轨重叠成像等技术来获取三维高程信息, 这些方法与 LiDAR 技术相比, 不但测距精度低, 数据处理也比较复杂。正因为如此, LiDAR 技术与成像光谱、合成孔径雷达(SAR)一起被列为对地观测系统(Earth Observing System, EOS)计划中最核心的信息获取与处理技术。

LiDAR 技术在西方国家发展相对成熟, 已经投入商业运行的激光雷达系统(主要指机载)主要有 Optech(加拿大)、TopSys(法国)和 Leica(美国)等公司的产品。由于机载 LiDAR 激光发散角、扫描视场角、飞行区域等因素的限制, 阻碍了机载 LiDAR 对全球范围数据的获

取^[1]。

与机载 LiDAR 相比, 星载 LiDAR 具有许多不可替代的优势。星载 LiDAR 采用卫星平台, 运行轨道高、观测视野广, 可以触及世界的每一个角落, 为境外地区三维控制点和数字地面模型(Digital Elevation Models, DEM)的获取提供了新的途径, 无论对于国防或是科学研究都具有十分重大的意义。星载 LiDAR 还具有观察整个天体的能力, 美国进行的月球和火星等探测计划中都包含了星载 LiDAR 传感器, 所提供的资料可以用于制作天体的综合三维地形图。此外, 星载 LiDAR 在植被垂直分布测量、海面高度测量、云层和气溶胶垂直分布测量以及特殊气候现象监测等方面也可以发挥重要作用^[2]。

1 国外主要星载 LiDAR 发展概况

目前, 世界上主要的空间大国都在开展星载 LiDAR

收稿日期: 2007-05-29

作者简介: 李 然, 北京市海淀区北三环西路 54 号中国科学院遥感卫星地面站, 研究方向为遥感应用; E-mail: rli@rsgs.ac.cn

唐伶俐(通讯作者), 北京市海淀区北三环西路 54 号中国科学院遥感卫星地面站, 研究员, 研究方向为卫星遥感图像处理与应用; E-mail: lltang@aoe.ac.cn

研究,如美国、欧洲和日本等都提出并实施了一些星载 LiDAR 发展计划。下面对 20 世纪 90 年代以来关于星载 LiDAR 的主要科学研究进行详细介绍。表 1 列出了各星载 LiDAR 系统的详细参数。

1.1 美国星载 LiDAR 系统

美国航空航天局(NASA)在星载 LiDAR 的研制和应用上一直独占鳌头^[3]。1994 年 Clementine 探月计划中,采用了星载 LiDAR 获取高精度月球表面特征信息。1996 年发射的火星全球勘探者号 MGS(Mars Global Surveyor)搭载了火星轨道激光测高仪 2 号 MOLA-2 (Mars Orbiter Laser Altimeter),获取了大量火星表面的地形特征数据。在 MOLA-2 建造、试验和发射准备的同时,NASA 利用 MOLA 研制过程中的备份器件,进行了航天飞机搭载 LiDAR 的试验,即 Shuttle Lidar Altimeter-01 (SLA,1996 年 1 月)和 SLA-02(1997 年 8 月),获取了高精度全球控制点信息。而后 NASA 根据早先提出的采用星载 LiDAR 测量两极地区冰面变化的计划,正式将地球科学激光测高仪 GLAS (Geosciences Laser Altimeter System)列入地球观测系统(EOS)中,并将其搭载在 ICESat(Ice, Cloud and Land Elevation Satellite,冰体、云量和陆地高度监测卫星)上,于 2003 年发射升空运行,是目前唯一在轨运行的星载激光测高系统^[4-5]。

1.1.1 NASA/LaRC 的星载差分吸收雷达

NASA Langley 研究中心 1994 年承研空间激光雷达实验项目 LITE(Lidar In-space Technology Experiment)中的星载差分吸收激光雷达 (Differential Absorption Lidar, DIAL),主要用于大气成分的测定,如水蒸气、臭氧及大气污染体的空间浓度分布等,可以提供对流层的臭氧和气溶胶的剖面图。星载 DIAL 系统的卫星轨道高度为 400 km,选用高功率的可调谐紫外光激光器,两个能穿透同温层的激光波长 308/318 (± 2) nm,

表 1 国外主要星载 LiDAR 系统参数

Table 1 Parameters of main overseas Spaceborne LiDAR system

系统		Clementine	MOLA-2	NRL	GLAS	ATLID
基本参数	质量/kg	2.37	25.85	5	300	240
	功耗/W	6.8	34.2	20.7(最高) 16.5(平均)	330	450
发射及轨道信息	平台	月球探测器 Clementine	火星探测器 MGS	近地小行星探测器 NEAR	ICESat 卫星	卫星
	发射时间	1994	1996	1996	2003	1996
	计划寿命/a	3	3	1	3	3
	轨道高度/km	640	400	50	600	800
	观测对象	月球	火星	Eros 小行星	极地冰盖、 云、气溶胶	云顶高 和云层边界
激光器	型号	Nd:YAG @532/1064nm	Nd:YAG @1064nm	Nd:YAG @1064nm	Nd:YAG @532/1064nm (3 备份)	DPSS Nd:YAG @1064nm
	脉冲宽度/ns	<10	8	12	4	20
	脉冲重复频率/Hz	Continuous@1Hz 400shots@8Hz	10	1/8, 1, 2, 8	40	100
	单脉冲能量/mJ	171mJ@1064nm 9mJ@532nm	48	>5	75mJ@1064nm 35mJ@532nm	100
	光束发散角/mrad	<0.5mrad@1064nm 4mrad@532nm	0.4	0.235	0.1	0.176
接收系统	望远镜口径	与高分辨率 相机共用, $\phi 12$ mm	$\phi 500$ mm	$\phi 90$ mm	$\phi 1.0$ m	$\phi 600$ mm (数目:4)
	视场角(FOV)	1 mrad 总接收面积 0.5 mm ²	0.85 mrad	>0.9 mrad	0.475mrad@1064nm 0.15mrad@532nm	扫描角 $\pm 23.5^\circ$ 观测幅宽 700 km
	光电转换器件	Si APD	Si APD	Si APD	Si APD	Si APD
	时钟计数频率	3~23 MHz	100 MHz	480 MHz	1 GHz	—
精度指标	垂直分辨率/m	40	1	0.32	1064 nm: 0.15 m (冰、陆地) 532 nm: 75~200 m (云)	40
	水平分辨率	100 m	沿轨方向 300 m 跨轨方向 4 km	500 m	1064 nm: 170 m (沿轨方向) 532nm: 150 m/50 km (云/气溶胶)	10 km

以保证在同温层内吸收线强度。由于 DIAL 所测量到的这两种波长光信号的衰减差是待测对象的吸收所致, 因此通过数据分析便可得到待测对象的浓度分布, 从而达到测量的目的^[6-7]。

1.1.2 月球观测 Clementine 系统中的星载 LiDAR 设备

1994 年 1 月 25 日, 由美国国防部和美国 NASA 联合研制的月球探测器 Clementine 在 Vandenberg 空军基地发射升空。在 Clementine 系统中, 有紫外/可见光/近

远红外相机以及激光测距仪 (LiDAR) 等多个探测器同时工作, 以尽可能多地获取月球的有关信息 (见图 1)。Clementine 上的 LiDAR 设备测量所得的数据资料用于制作月球表面高程图, 也可以用于研究岩石圈的应力应变特性; 或结合重力信息研究月球外壳密度分布等。Clementine 系统中星载 LiDAR 设备运行的实际轨道高度为 640 km, 覆盖了月球两极 60° 之间的范围, 在轨测量时运行 45 min 后可以稳定在 1 Hz 的脉冲重复频率^[8]。

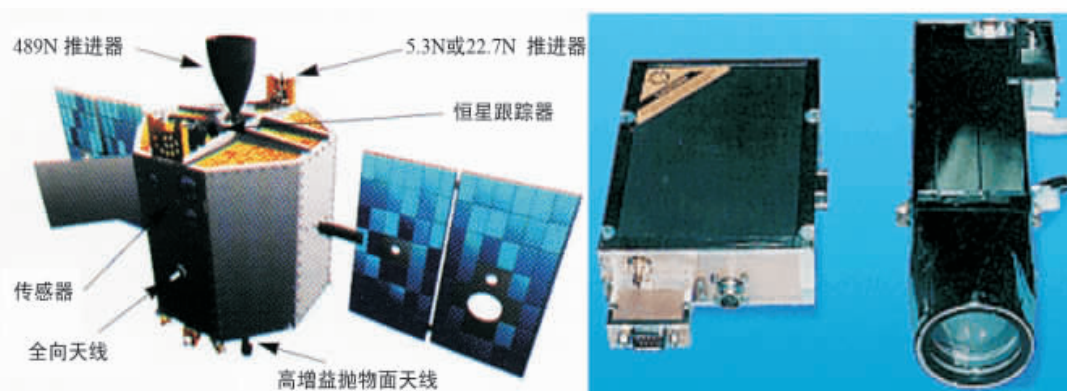


图 1 Clementine 卫星及其上的 LiDAR 设备

Fig. 1 Clementine and LiDAR system

1.1.3 火星勘探者号搭载的 MOLA-2 系统

火星全球勘探者号 MGS 宇宙飞船由美国 NASA Goddard 空间飞行中心组织研发, 于 1996 年 11 月 7 日发射升天, 星载 LiDAR 测高系统 MOLA-2 是其搭载的四大仪器之一。MGS 历时两年到达火星, 并顺利进入 400 km 圆轨道, 对火星地形进行测量。MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) 探测的主要目的就是确定火星球体的地貌, 为星体地质科学和物理学研究提供更多的资料; 另外一个目的是研究火星表面反射率特征、分析球体表面矿物学分布, 以及反射率的季节变化, 为大气循环方面研究提供必要支持, 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。图 2 给

出了 MOLA 系统外形及其探测到的火星表面高程图^[9-10]。

1.1.4 观测空间小行星的 NRL 系统

Eros 小行星距地球 2.6×10^8 km, 运行轨道介于火星与木星之间, 是近 800 颗对地球拥有潜在威胁的近地小行星之一。由于其上面可能存在太阳系的原始信息, 因此具有极高的科学研究价值。NEAR (Near Earth Asteroid Rendezvous) 是空间平台上的近地小行星交会探测器, 于 1996 年升空, 于 2000 年 2 月 14 日成功进入 Eros 的运行轨道, 进行为期 1 年的近距离小行星观测计划。NEAR 系统中的 LiDAR 系统 NLR (NEAR Laser Rangefinder) 主要由 5 个部分组成: 带光纤延迟的激光发射和激光电源部分、光学接收部分、带探测器件的模拟电路及处理器、数字处理电路和低电压供电电源。NLR 是世界上第一个进入小行星轨道的激光测高仪, 在绕小行星轨道工作的 1 年时间里一直持续工作^[11-12]。

1.1.5 地球观测 GLAS 系统

世界上首颗激光测高试验卫星 ICESat 于 2003 年 1 月 13 日在美国 Vandenberg 空军基地成功发射, 星上装载了地球科学激光测高仪 GLAS (图 3)。ICESat 轨道高度约 600 km, 周期约 183 d, 可覆盖地表 86°N~86°S 即两极的大部分区域。作为 EOS 计划的一部分, GLAS 是第一个用于连续全球观测的星载激光测高系统。其主要任务是监测南极洲和格陵兰冰盖的高程变化, ICESat

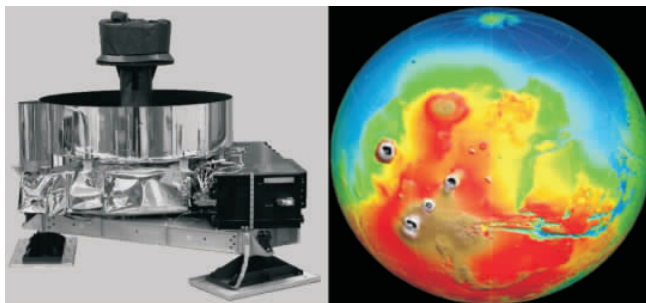


图 2 MOLA 系统及其测量的火星表面高程图

Fig. 2 MOLA system and Martian DME

的科学目标主要是: ① 了解极地冰雪变化的物质总量平衡, 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; ② 测量全球范围内的云层高度和云/气溶胶垂直结构, 用于研究全球温度平衡; ③ 绘制陆地拓扑图, 测量陆地表面粗糙度和反射率、植被冠盖高度以及雪盖面和冰面的表面特征, 用于一系列科学及潜在的商业应用^[13-15]。

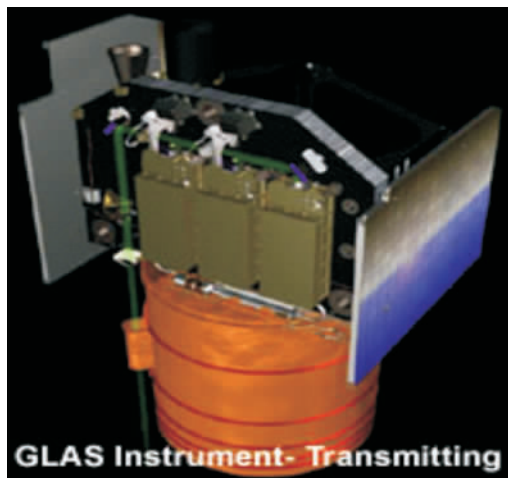


图 3 GLAS 系统
Fig. 3 GLAS system

1.2 欧洲空间局星载 LiDAR 系统

欧洲空间局(ESA)在过去 20 年进行了多项激光雷达试验, 其中包括后向散射光雷达 ATLID 和多普勒测风激光雷达 ALADIN。1996 年发射的 ATLID (Atmosphere LIDAR) 是 ESA 支持的第一个空间激光雷达项目, 主要用于进行云顶高和云层边界层测量, 利用线性扫描扩大观测视场以保证在 800 km 轨道高度进行全球覆盖。ADM-Aeolus (Atmospheric Dynamics Mission) 计划 2008 年将 1 个创新型测风激光雷达 ALADIN 送入太空, 测量 30 km 以上地球大气的风速分布。

1.3 日本星载 LiDAR 发展计划

ELISE 是一个以科学实验卫星 (MDS-2) 为平台的双波长后向散射激光雷达项目, 其研究目的是观察全球的云/气溶胶分布和获得云的多层结构的信息。ELISE 原计划于 2002 年发射, 但之后被取消, 取而代之的是正在研究的新空间平台激光雷达 ATMOS-B1/ERM 计划。计划于 2007 年发射的月球探测器 SELENE, 主要目的是获取月球起源和发展演化的科学数据, 将搭载星载 LiDAR 系统 LALT^[17-19]。

2 星载 LiDAR 主要应用

星载 LiDAR 能全天时对地观测, 受地面背景、天空背景干扰小, 并具有高分辨率和高灵敏度。这些特点使它在地形测绘、环境监测、森林调查等方面的应用具有

独特的优势。目前, 星载 LiDAR 的应用技术研究已从最初的单一目的发展到多学科、多领域的应用。

2.1 天体测绘

星载 LiDAR 可以在卫星上采集和处理数据, 具有观察整个星体的能力, 所以在月球和火星等探测计划中都包含了激光雷达测高计, 这有助于制作这些天体的综合地形图, 使天体表面地形特征的高程信息更加精化, 也是未来进行登陆探测的着陆地点选择依据。而且这些探测器不仅可以提供所测星体的地貌, 还为星体地质和物理科学等研究方面提供更多宝贵的资料, 如表面反射率季节变化、大气结构、岩石圈密度分布等。

2.2 全球高程信息的采集

2000 年, 美国执行了“航天飞机雷达地形测绘任务”SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)。这次任务所采集的是以地心坐标系为基础的数据, 其传感器、处理方法、影像分辨率、采集时间都是一致的, 第一次解决了陆、海以及世界各地之间地形数据的统一问题。10 天采集的全部原始数据仅处理时间就需要约两年, 最终获取的全球数字高程模型 (DEM) 可以将美军现有的全球 DEM 精度提高约 30 倍^[20]。

星载 LiDAR 所能获取的高程数据比普通干涉雷达精确得多, 而且 LiDAR 的数据后处理工作也更为简单。美国的 GLAS 系统激光光斑尺寸为 70 m, 间隔 170 m, 数字化采样频率高达 1 GHz, 相当于 15 cm 的采样间隔, 其高程精度明显高于 SRTM。即使在人迹罕至、测绘困难的两极地区, 也可以进行高精度的测量。

2.3 全球控制点的采集

航拍或高分辨率卫星影像制成的地图, 必须经过地面控制点的精确校正才能达到高定位精度。近年来美军所使用的战地电子地图精度约 10 m, 在阿富汗以及伊拉克游击战期间, 美军地面部队搜寻恐怖组织时使用这种地图已经足够, 但这样的精度显然不足以用来引导高精度导弹。由于星载 LiDAR 具有对云层、植被的穿透能力, 还具有高精度、全天时、覆盖面积广等特点, 将成为采集全球控制点最有效的方法。美国 NASA 在 1996 年和 1997 年进行了两次航天激光测高仪 (SLA) 测量, 建立了基于 SLA 的全球控制点数据库, 激光光斑大小为 100 m, 光斑间隔为 750 m, 每秒发射 10 个脉冲, 接收机数字采样频率 100 MHz, 测高精度达到 1.5 m, 基本上覆盖了全球南北纬 60° 之内的区域。

2.4 环境监测的应用

2.4.1 极地冰盖监测

极地冰雪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的变化。星载 LiDAR 是目前用于研究两极冰雪变化的最有效的手段之一。ICESat 上的激光测高仪 GLAS 能够精确地测量

极地冰盖表面特征、冰层厚度变化,能够制作较大比例的冰盖拓扑图,还可测量海冰高程、粗糙度、厚度及表面反射率等。另外, GLAS 测高数据还将极大地改进极地冰盖物质总量平衡模型和冰盖地形详图。星载 LiDAR 相对于雷达测高仪表现出明显的优越性,尤其针对极地研究, ICESat 对极地监测的覆盖范围更广、对象更多、测量精度和分辨率更高。可以预见,星载 LiDAR 将更多地用于测量南北两极冰盖的地形、监测极地冰雪物质平衡变化,以及由于两极冰雪变化而引起的全球海平面变化^[24-26]。

2.4.2 林业资源调查

星载 LiDAR 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的地形,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。目前,美国 GLAS 星载激光测距仪,除了用于测量冰盖地形、监测云层和大气的特性外,另一个重要的应用领域便是对林业资源的调查。

2.4.3 大气成分和结构测量

LiDAR 用于大气成分监测的机理是通过被测气体对激光的散射、吸收、消光等物理作用,定量分析激光大气回波,达到监测大气的目的。LiDAR 可测量大气的温度、湿度、风速、能见度、云层高度、城市上空污染物的排放浓度等。与传统的取样法监测大气污染相比, LiDAR 具有高时空分辨能力、监测范围大等优点^[27]。

目前,应用于星载的大气监测 LiDAR 主要为差分吸收(DIAL)激光雷达。ICESat 利用 1 064/532 nm 双波长对全球云/气溶胶垂直结构、行星边界层高度及极地对流层和同温层的云层进行观测,这些数据对于了解辐射平衡以及完善大气降水模型都尤为重要^[24]。

3 我国发展星载 LiDAR 的展望

星载 LiDAR 在短短几十年中的迅猛发展,体现出这个新兴探测方式所具有的独特潜在力,星载 LiDAR 将越来越多地用于科学研究或军事战略等众多领域,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,必将成为未来空间探测的发展趋势。

我国早在 80 年代就开始了 LiDAR 的研究,也已经制定了星载 LiDAR 计划。2004 年 2 月正式启动的月球探测计划——“嫦娥”一号绕月卫星,计划搭载激光高度计用于月球表面的高度探测,探测数据与 CCD 光学相机的平面图像叠加处理后可以得到月球表面三维地形图形,为今后“落月”计划的实施提供基础数据。如果按计划于今年下半年发射,“嫦娥”一号也将成为我国第一颗搭载 LiDAR 的空间探测器。此外,为加快我国激光雷达技术的发展,国家科技部在 863 计划中也相继布置了有关星载激光雷达系统的预研课题。

国际空间大国激光雷达技术发展的历程表明,机载激光雷达系统的研制和应用是发展星载激光雷达的技术基础。在我国,中国测绘科学研究院、中国科学院武汉测量与地球物理研究所、武汉大学、中国科学院光电研究院等许多研究机构都已经开展了机载 LiDAR 技术的研究工作,并已取得了相当可喜的成绩,已经形成了研制机载 LiDAR 的能力,为发展星载设备奠定了坚实的基础。但是目前我国在 LiDAR 理论研究、硬件设备以及数据应用方面与国际水平还存在较大的差距,星载 LiDAR 关键技术还有待进一步研究和论证。虽然星载 LiDAR 与机载 LiDAR 从工作原理上没有本质的区别,但天基系统对各组成单元的技术要求明显高于地面系统。由于特殊的空间运行环境,星载 LiDAR 对其各个分系统的设计也有特殊的要求,例如星载激光器对体积、重量、功耗、制冷方式、工作寿命及抗失调能力方面都有一系列特殊要求;光电探测器的高灵敏度和低噪声要求,回波信号的高速采样和高速存储和传输,对整个测量过程的智能控制及卫星与地面的数据通信等;空间环境(如大气)引起的星载 LiDAR 数据噪声剔除和复原;星载 LiDAR 数据应用过程中的算法研究和产品提取技术等。只有实现对各单元技术的突破和系统整体的集成,才能使星载 LiDAR 研究真正走向实用。此外,数据应用技术如数据预处理加工、算法研究和产品提取等还不能满足真正的应用需求,这也将导致卫星的使用效益不能充分发挥。

研究和解决星载 LiDAR 的关键技术,建立起自己的星载 LiDAR 系统,将为我国的地形地貌测量、大气监测、海洋科学以及空间探测等科学研究提供必要的手段,具有重要的科学和应用价值,是提升我国空间科研水平和综合国力强有力的保证。

参考文献 (References)

- [1] 罗志清, 张惠荣, 吴强, 等. 机载 LiDAR 技术 [J]. 信息技术, 2006(2): 22-25.
LUO Zhiqing, ZHANG Huirong, HAO Qiang, et al. The airborne LiDAR technology [J]. Information Technology, 2006(2): 22-25.
- [2] 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.
LI Song. Recent progress of spaceborne laser altimeter system [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2004, 2 (6): 4-6.
- [3] 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.
XU Daisheng, HUANG Genghua, SHU Rong, et al. The comprehensive properties analysis for spaceborne laser altimeter[J]. Infrared, 2005(1): 1-8
- [4] BUFTON J L. Laser altimetry measurement from aircraft and spacecraft [C]// Proceeding of the IEEE. 1989, 77(3):

- 463–477.
- [5] GARDNER C S. Ranging performance of satellite laser altimeters[J]. IEEE Trans on Geoscience, Remote Sensing, 1992, 30(5): 1061–1072.
- [6] 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.
GAO Jun, DAI Yongjiang, WANG Lixia. Status of space-based active optical remote sensing [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2000, 21(2): 14–22.
- [7] 杨 洋. 激光雷达在大气测量中的应用 [J]. 现代物理知识, 2001, 13(3): 31–32.
YANG Yang. Applications of lidar to atmospheric measurement[J]. Modern Physics, 2001, 13(3): 31–32.
- [8] SMITH D E, ZUBER M T, NEUMANN G. A, *et al.* Topography of the moon from the Clementine lidar[J]. Journal of Geophysics Research, 1997, 101(E1): 1591–1611.
- [9] ABSHIRE J B, XIAOLI SUN, AFZA1 R S. Mars orbiter laser altimeter: receiver model and performance analysis [J]. Applied Optics, 2000, 39(15): 2449–2460.
- [10] NEUMANN G A, ABSHIRE J B, AHARONSON O, *et al.* Mars orbiter laser altimeter pulse width measurements and footprint-scale roughness[J]. Geophysical Research Letters. 2003, 30(11): 1561–1564.
- [11] COLO T D, CHENG A F, ZUBER M, *et al.* The laser rangefinder on the near earth asteroid rendezvous spacecraft[J]. Acta Astronautica. 1996, 39(1–4): 303–313.
- [12] COLO T D. NEAR laser rangefinder: A tool for the mapping and topologic study of asteroid 433 Eros [J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 1998, 19(2): 142–157.
- [13] ABSHIRE J B, SUN XIAOLI, RIRIS H, *et al.* Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat mission: Pre-launch and on-orbit measurement performance[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'03, Proceedings 2003 IEEE International, 2003.
- [14] GLAS Instrument Team. Geoscience laser altimeter system preliminary design review [R/OL]. NASA Goddard Space Flight Center, 1998(1): 12–14, [2007]. <http://icesat.gsfc.nasa.gov/>.
- [15] GLAS science team geoscience laser altimeter system GLAS science requirements document [R/OL]. Center for Space Research, University of Texas at Austin, [1997–10]. <http://icesat.gsfc.nasa.gov/>.
- [16] 王建宇, 洪光烈. 激光主动遥感技术及其应用 [J]. 激光与红外, 2006, 36(S): 742–748.
WANG Jianyu, HONG Guang. Technologies and applications of laser active remote sensing [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(S): 742–748.
- [17] SUGIMOTO N, LIU Zhaoyan, VOELGER P, *et al.* Cloud and aerosol observation planned with the space-borne lidar "ELISE" and the ATMOS-B1/ERM lidar [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000, Proceedings IGARSS 2000. IEEE 2000 International, 2000, 4: 1778–1780.
- [18] KAWAMURA Y, IMAI T. Development of spaceborne LiDAR; ELISE (Experimental Lidar In Space Equipment) [C]. Lasers and Electro-Optics 1999, Pacific Rim Conference, 1999, 2: 270–271.
- [19] KASE T, ABE K, HOTTA T, *et al.* LALT: Laser Altimeter for luna exploring satellite Selene [J]. NEC Res & Develop 2003, 44(2): 175–180.
- [20] 汪 凌. 美国航天飞机雷达地形测绘使命简介 [J]. 测绘通报, 2000, 12: 38–40.
WANG Ling. A brief introduction to US shuttle radar topography mission[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2000, 12: 38–40.
- [21] 李德仁. 论 21 世纪遥感与 GIS 的发展 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2003, 28(2): 127–131.
LI Deren. Towards the development of remote sensing and GIS in the 21st Century [J]. Geometrics and Information Science of Wuhan University (Inf Sci ed), 2003, 28(2): 127–131.
- [22] 王广昌, 张 曙. 星载激光雷达发展概况[J]. 光电子技术与信息, 1996, 9(5): 1–6.
WANG Guangchang, ZHANG Shu. Recent progress on spaceborne lidar[J]. Optoelectronic Technology & Information, 1996, 9(5): 1–6.
- [23] 胡明城. 空间大地测量的最新进展(II) [J]. 测绘科学, 2001, 26(4): 53–56.
HU Mingcheng. Recent advances in space geodesy (II) [J]. Science of Surveying and Mapping, 2001, 26(4): 53–56.
- [24] 鄂栋臣, 徐 莹, 张小红. 星载激光测高及其在极地的应用研究分析[J]. 极地研究, 2006, 18(2): 148–155.
E Dongchen, XU Ying, ZHANG Xiaohong. Preliminary study of application of satellite laser altimetry technology in polar region [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2006, 18(2): 148–155.
- [25] BRENNER A C, *et al.* Derivation of range and range distributions from laser pulse waveform analysis for surface elevations, roughness, slope, and vegetation heights, GLAS algorithm theoretical basis document, Version 2.0 [R/OL]. [1999]. <http://icesat.gsfc.nasa.gov/>.
- [26] ZWALLY H J, SCHUTZ B, ABDALATI W, *et al.* ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean and land [J]. Journal of Geodynamics, 2002, 34 (3–4): 405–445.
- [27] 吴桂英. 空间多普勒和后向散射激光雷达的应用. 光机电信息, 1996, 13(4): 30–34.
WU Guiying. Applications of space Doppler lidar and backscattering LiDAR [J]. OME Information, 1996, 13(4): 30–34.

(责任编辑 朱 宇)