

# 激光雷达应用技术研究进展

刘 斌 张 军 鲁 敏 滕书华 马燕新 张文广  
(国防科技大学电子科学与工程学院 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 随着激光成像雷达技术的快速发展,激光雷达三维点云数据在多个领域展现出良好的应用前景。本文首先概述了激光雷达的基本原理和性能优势,进而重点阐述了激光雷达在调查监测、建模测绘、探测测量、医疗、军事等各方面的实际应用。

**关键词:** 激光雷达; 点云数据; 研究进展

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2015.02.001

## Research progress of laser radar applications

LIU Bin ZHANG Jun LU Min TENG Shu-hua MA Yan-xin ZHANG Wen-guang

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** With the rapid development of laser imaging radar technology, laser radar 3D point cloud data have a good application prospect in many fields. Firstly the basic principle and advantages of laser radar are outlined, and then the applications of laser radar are expounded, such as investigation and monitoring, modeling of surveying and mapping, detection measurement, medical and military etc. Finally the development trend of laser radar is analyzed.

**Key words:** laser radar; point cloud data; research progress

### 1 引 言

激光雷达(Lidar)是传统雷达与激光技术相结合的产物。以微波雷达原理为基础,将激光束作为新的探测信号,充分发挥了激光亮度高,具有良好的方向性、单色性和相干性的特点,使激光雷达具备了频率快、峰值功率高、波长范围广、体积小等技术优势。激光雷达系统结合全球定位系统(GPS)和惯性导航系统(INS),可以快速、准确地获取测量点的高精度三维坐标数据,建立数字线划地图、数字正射影像图、数字高程模型等,在各个领域得到广泛应用,已成为当今科学研究、理论创新的热点,倍受关注。

本文在对激光雷达的基本原理和性能分析的基础上,重点介绍了激光雷达在调查监测、建模测绘、探测测量、医疗、军事等各方面的实际应用。

### 2 激光雷达工作原理及特点

#### 2.1 激光雷达工作原理

激光雷达工作时,首先由发射机发射一束特定功率的激光束,经过大气传输辐射到目标表面上,反射的回波由接收装置接收,再对回波信号进行处理,提取有用信息。通过测量反射、散射回波信号的时间间隔、频率变化、波束所指方向等就可以确定目标的距离、方位和速度等信息,然后结合激光器本身的位置信息和姿态角度信息,准确计算出目标表面回波点的三维坐标。

#### 2.2 激光雷达技术优势

激光雷达在一些关键技术指标上远远超越了其他遥感探测技术,使其在很多领域得以广泛应用。具体包括:

##### (1) 数据密度大

作者简介: 刘 斌(1980-)男,在职研究生,主要研究激光雷达数据与可见光图像配准及融合应用。

E-mail: lb8142@163.com

收稿日期: 2014-06-12; 修订日期: 2014-07-08

激光波束窄,探测次数多,因而采集数据量更大。每秒可测量数十万个点,对真实物体表面(如地面)的还原和建模带来极大方便。同时,可调节点采集间隔,大大提高了适用性和工作效率。

### (2) 数据精度高

由于激光波长短、频率高,可以使激光雷达达到极高的测量精度。高精度测量激光雷达测量精度可达毫米以下,机载激光雷达测量精度也可达厘米级。

### (3) 植被穿透能力强

如图1所示,激光在植被中传播时,可以在树冠、树枝、地面等多个高程发生反射,从而得到多次回波数,这是其他雷达所不具备的优势。特别是得到的地面回波数据,有效克服了植被影响,使精确探测地面真实地形成为可能<sup>[1]</sup>。

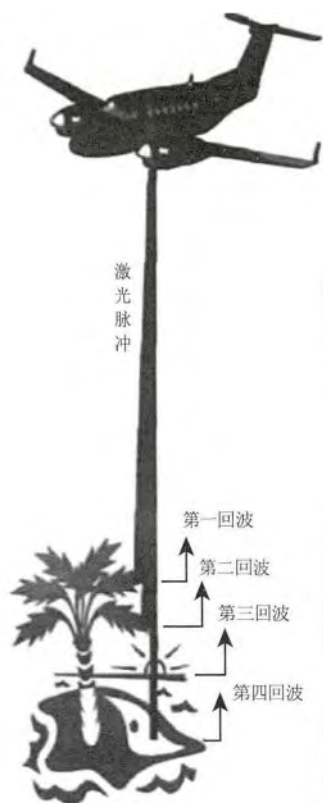


图1 激光雷达多次回波示意图

### (4) 不受太阳高度角和阴影影响

激光雷达为主动测量式雷达,不依赖自然光,因而与传统方式相比,其获取数据的精度不受时间、太阳高度角和地物阴影的限制和影响,可以24 h全地形作业。

### (5) 隐蔽性好、抗干扰能力强

激光传播方向性好、波束窄,只在传播路径上存在,难以发现和截获。同时,激光雷达口径小,且定向接收,只接收指向区域回波,接收干扰信号的概率极低。

### (6) 体积小、重量轻、作业效率高

激光雷达发射口径只有几厘米,重量小的可以单人手持使用,相较其他雷达设备要轻便、灵巧得多,不但可以大量节约人力、物力资源,而且可以使工作变得更加简单快捷<sup>[2]</sup>,可应用的领域也更广。

## 3 激光雷达的应用现状

目前,激光雷达以其无可比拟的优越性能,已经发展成既可“上九天”拍摄月球三维图像,又可“下五洋”进行水下探测和建模的探测雷达。激光雷达典型应用包括:

### 3.1 调查监测方面的应用

#### 3.1.1 林业调查

环境监控、森林土地管理、生物研究都需要及时准确地掌握森林植被信息。传统技术无法获取树高与森林密度值,激光雷达可以通过记录完整回波波形(大光斑:10 m到100 m)反演出森林的垂直结构与生物量<sup>[3]</sup>;或是记录少量的离散回波(小光斑:0.1 m到1 m),利用高密度的激光点云数据,进行精确的单木高度估测<sup>[4-5]</sup>。图2给出了利用点云数据进行地面及树冠高程识别图示,从而计算每株树木的高度值。



图2 激光雷达测量林中单株树木树高

#### 3.1.2 水域监测

激光雷达已被用于海水深度测量和海浪波高观测,以及对水中所含浮游生物、透明度、盐度、水温 and 油污等数据进行精确测量。同时,激光雷达对于河流、湖泊的水量监控和水患治理也有极其重要的作用。利用激光雷达产生的三角网高程三维模型,可直观显示洪水的覆盖范围,测算出水位淹没区域面积和水体体积,预测危害程度,采取有效措施进行救援。通过对比激光点云数据还可以监测海岸侵蚀情况。

#### 3.1.3 大气检测

激光雷达作为一种先进的大气和气象环境监测仪器,已经在大气探测和气象监测中广泛应用于大气温度、湿度、风速、能见度、云层高度、城市上空污染物浓度等测量。激光雷达具有更高的时空分辨率,激光波长为微米量级时,可以实现对微粒目标探

测,能够对大气的垂直结构和成分构成进行有效分析。通过对相应波段激光在大气气溶胶粒子、分子和原子中发生米氏散射、瑞利散射、拉曼散射、荧光散射以及共振色散等效应的数据进行反演,可以对大气污染、大气边界层、空气分子分析等方面的深入研究提供可靠的数据依据<sup>[6]</sup>。此外,激光雷达利用激光的多普勒效应,可以测量激光在大气传播中产生的多普勒频移,能够反演和预测空间风速分布信息<sup>[7]</sup>。

### 3.2 建模与测绘方面的应用

#### 3.2.1 地质测绘

激光雷达测量精度要优于传统测量方法,所提供的地面点云数据,可详细反映出所测地物的立体形态,实现三维建模,满足高精度影像微分纠正的需要<sup>[8]</sup>。图3分别为2006年和2009年张家湾滑坡群的点云建模图,通过对比可以发现山体出现了细微的滑坡。同时,激光雷达真正实现了非接触式测量,减少了野外作业量,摆脱了数字摄影测量平台的限制,降低了地质测绘成本。

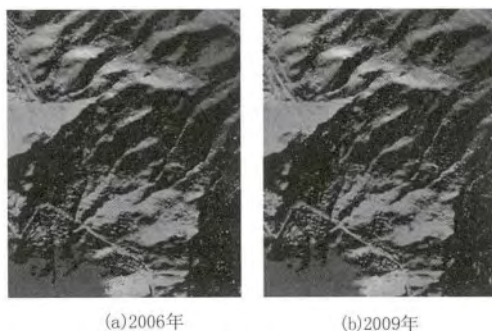


图3 2006年和2009年激光雷达监测山体滑坡对照图

#### 3.2.2 数字城市建模

激光雷达在城市场景中更能体现其数据采集密度大、分辨率高、不受阴影遮挡限制的优势。激光雷达数字地面模型DEM与GIS系统结合起来,可以将2D的数字城市“升级”为3D数字城市,更直观和真实地还原城市场景。因此,激光雷达被广泛应用于数字城市的三维建模、大型建筑物采样等大比例尺地物数据获取<sup>[9]</sup>。利用点云数据对城市三维建模,可以进一步应用于道路、水管网的立体化规划,以及通过专业软件对城市噪音分布、风场流向、热岛效应进行详细分析,以及城市灾害分析和抢险救灾指挥。

#### 3.2.3 水下探测及三维成像

水下激光雷达是激光雷达的一种,它主要利用蓝、绿激光在海水中衰减小、穿透性好的特性,利用激光对淹没在水中的目标进行搜索、跟踪、控制、通

信、定位、识别和分类。与陆地应用相同,将水下激光雷达与全球定位系统(GPS)和惯性导航系统(INS)综合运用,可以测量水下目标的三维信息,构建目标的三维模型。激光雷达不仅可以对海底地貌、岛礁周边海域测绘建模,在水下工程设计、施工、维护中也发挥着十分重要的作用。

#### 3.2.4 文物古迹数字化

目前,国内外部分文物保护单位为完善文物古迹的研究、修缮、传播手段,开始应用激光雷达采集文物古迹的三维数据,建立相关数据库,辅以计算机技术,实现珍贵文物的三维虚拟再现。图4为使用高精度测量激光雷达虚拟还原的恐龙骨骼化石三维模型。与实物文物的不可再生性不同,数字文物可以无限共享,更具传播意义。高精度的文物三维信息也使文物的修复和仿制工作变得更加容易<sup>[10]</sup>。

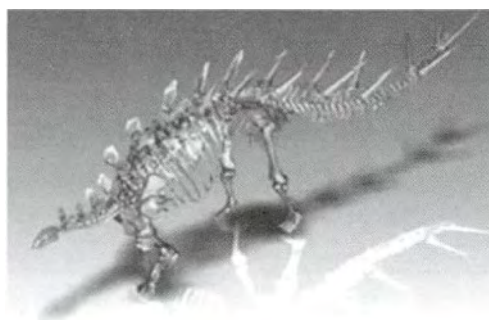


图4 利用激光雷达对文物3D建模

### 3.3 探测与测量方面的应用

#### 3.3.1 带状工程探测

将激光雷达技术已经越来越广泛地应用于电力、石油管网、公路、铁路等大型工程测量中。工程初期,通过激光雷达对整个施工带域内的地势走向和植被分布进行探测,得到精确的三维数据。不但便于宏观立体式的规划设计,还可以对施工土方的面积、体积和砍伐树木的木材量准确估算,合理制定施工计划、调配施工资源。尤其,在地形繁杂、地域跨度大,施工地区生活保障条件差、危险程度高等不适宜人工作业的情况下,更适宜使用激光雷达进行精确测量和分析<sup>[1]</sup>。例如:尼日尔某原油管道施工过程中,沿线城镇少,可用交通资源不足,工程地域疾病频发,常有反政府武装袭击,为解决工程前期勘测难题,就采用了机载激光雷达进行勘测。

激光雷达可以实时、准确地掌握目标地域的宏观场景和细节变化,也被应用在线路和管网巡检和维护中,利用高精度三维点云数据,分析查找细微变化,预先找到潜在事故点,极大地方便了维护管理和应急抢修。如图5为某野外高压输电线的点云数



据,从清晰图像中可以对电线进行识别和监测<sup>[11]</sup>。在工程抢修中应用激光雷达对施工精度进行监测,能够实时、准确、直观地反映现场情况,提高了施工安全性和工程作业效率。

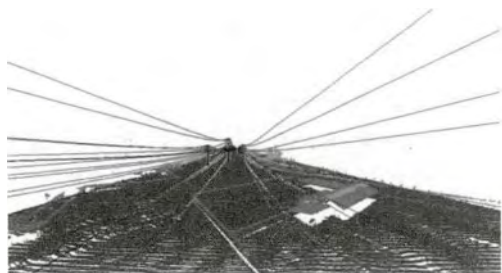


图5 激光雷达对野外悬链线和高压线塔扫描建模

### 3.3.2 航天工程中的应用

激光雷达以其质量轻、体积小、精度高的特点,为各国航天部门所关注,大力进行研发,在人类探索地外空间的进程中发挥了巨大作用。中国的嫦娥探月工程中就使用激光雷达对月球表面进行三维“扫描”,得到了月面的三维立体信息,为进一步探索月球做好了前期数据准备工作<sup>[12]</sup>。图6为星载激光雷达环绕月球飞行时所得到的月球表面高程图。“天宫”在与其它航天器空间交会对接过程中,使用激光雷达引导,调整速度、角度等方位参数完成对接;NASA应用激光雷达研究的自动着陆障碍避免技术,用于降低月球车的着陆风险;Sandia国家实验室研制的无扫描成像激光雷达,能够快速检测航天器隔热层的受损程度<sup>[13]</sup>;加拿大Optech公司利用激光雷达,对空间目标进行探测、定位、测距并获得目标三维信息,实现了对空间目标的有效监视<sup>[14]</sup>。



图6 利用星载激光雷达测量月球高程

### 3.3.3 自动导航、障碍规避

激光雷达可以快速精确地获取环境的深度信息,抗干扰能力强,而且受环境变化的影响小,通过激光定向或全向扫描,能够采集大量的精确有效信息。基于激光雷达探测数据,应用聚类-拟合等相关算法识别目标特征,完成对道路的提取、障碍感知和临近目标的检测。激光雷达因分辨率高、成本低的优点,近年来在障碍物判断、路面识别、定位及导航等诸多方面得到广泛应用。2010年,谷歌推出无

人驾驶系统,在公路实测的22.5万公里中,从未有过失控或造成人畜伤害的事故发生。

### 3.4 医学方面的应用

激光雷达以其精确的三维测量定位和生物特性识别能力,已经在部分医学领域得到应用。美国橡树岭国家实验室(简称ORNL)为减轻烧伤病人治疗中的痛苦,将激光治疗技术与激光雷达相结合,利用激光雷达进行三维定位探测,分析烧伤组织的损害程度,从而引导激光自动消除坏死的人体组织,利于新生细胞组织生长。同时,激光雷达也在五官整形、假肢设计以及人体生物特征监测等方面得到应用和研究<sup>[15]</sup>。

### 3.5 军事方面的应用

激光雷达具有无可替代的显著优点,其在民用领域的实际应用,很多都可以直接或间接用于军事用途。例如,激光雷达可以用于靶场测量、战场侦察、军用目标识别、火力控制、水下探测、局部风场测量等。而当基础材料、辐射材料、快速跟踪定位和成像技术等方面研究取得重大突破后,也必将首先应用于军事。目前,军事上较常见的激光雷达有以下几种:

#### 3.5.1 激光雷达制导技术

激光雷达分辨率高,可利用高精度三维影像数据实现对目标的准确识别。同时,激光雷达受假目标的热能辐射干扰小,大大提高了战术导弹的命中准确率。激光雷达制导技术早在1991年海湾战争中就得到应用。激光雷达可代替地形匹配中的微波雷达高度表,多普勒速度传感技术能够在低速测量时得到高精度数据,因此巡航导弹单次打击精度得以大大提高。美军还进一步应用激光雷达技术实现自动目标识别,利用激光雷达的特性在快速响应的同时降低了虚警率,从而能够在导弹发射后自动捕获目标,当目标丢失后能够自动捕获,并能计算出弹头最佳打击点,成为一种直接打击,且发射后不用管的智能武器。

#### 3.5.2 超低空目标探测、跟踪

基于激光雷达低空探测性能好、不受阴影和太阳高度角影响、隐蔽性好、抗干扰能力强三方面优点,激光雷达非常适合作为一种低空、超低空目标探测、跟踪雷达,填补该领域的空白,并且实际低空探测和跟踪效果非常好。激光雷达还可用于对己方发射导弹的低空飞行阶段及其他低空飞行目标进行参数测量、姿态调整和目标识别,不但在实战中作用巨大,而且能够在武器设备的试验阶

段提高数据采集精度,减少实验次数、缩短研发周期、节约研发成本。

### 3.5.3 侦察激光雷达

激光雷达的波长比常用的毫米波雷达小2到3个量级,而光学设备的波长越短分辨率越高,所以通过激光雷达获得的目标图像较微波雷达可识别程度要高的多。激光雷达波长极短且多普勒频移灵敏度高,能够达到极高的距离辨析和角度辨析,甚至可以作为每秒毫米级的距离测量设备。而激光雷达回波数据所特有的三维特性和植物穿透特征,实现了对隐蔽目标立体感知,战争中能够对目标更好地进行搜索、跟踪和识别。美国机载侦察激光雷达在目标上空飞行时,可将获得的数据影像在飞机显示器上实时显示,并将数据发至地面指挥系统和作战单元。

### 3.5.4 弹道导弹防御激光雷达

随着世界军事强国对弹道导弹的大力研发,特别是洲际弹道导弹的成功试射,各个国家都感到本土安全受到巨大威胁。弹道导弹的特点是飞行速度快、射程距离远、突防能力强。如果进行防御必须在导弹发射早期,完成对其的探测识别和跟踪定位,通过数据分析找到导弹起始发射点、目标命中点和最佳拦截点。将新兴的激光雷达技术与业已成熟的被动红外探测技术相结合,综合利用红外技术优秀的目标方位、俯仰参数测量能力以及激光雷达精确的距离测量能力,可以更加准确测量可疑飞行器的飞行方向、距离和速度参数,大大缩短了识别和锁定的时间,可以使导弹弹道的计算精度成数量级的上升,使后半程实施有效拦截成为可能。

### 3.5.5 化学/生物战剂探测激光雷达

生化武器是一种大规模、非人道的毁伤武器。即使在平时时期也被一些恐怖分子和极端主义者所利用,世界人民都面临着生化武器的威胁。各国都在采取相应措施,以加强对生化武器的有效探测与早期防范。传统生化探测,必须人工携带探测设备,在污染区进行大面积数据采集,不但速度慢、耗时长,而且人员易感染和中毒。因而研发一种能够对生化物质反应灵敏、响应快速的技术势在必行。当空气中含有特定的生化物质时,会改变空气的特性,使之对不同波段激光的吸收或反射特性增强。因而可以利用不同生化物质对应特定波长激光的这一特性,利用激光雷达差分吸收和散射、感应荧光、弹性后向散射等技术,对该毒剂气溶胶云进行探测。可以确定毒剂云的中心厚度、斜距、高度和中心坐标等参数,实现对生化武器的探测、识别和分析,减少报

警响应时间,提早完成诊断和防治工作,将灾难和损失降到最低。

### 3.5.6 电子对抗激光雷达

电子设备在战争中发挥的作用已经越来越大,现代化战争的核心是设备性能间的战争。如何对己方的指挥、通信设备实施保护,如何对敌方的设备进行干扰和欺骗,成为关乎成败的重要因素。而随着战争中电子设备的大量应用,各种设备的工作频率有时相当接近,只有辐射波段足够小,才能收到较好的干扰和抗干扰效果。激光波长是微波的千分之一、甚至是万分之一,使用激光雷达可以得到极窄的带宽和极高的角度辨析。因而,将激光雷达应用于电子对抗具有极其诱人的应用前景。

## 4 结 语

激光雷达作为一种新兴技术,目前被公认为复杂背景下最有潜力的目标探测技术。本文较为详细地介绍了激光雷达的原理、特点和典型应用。随着基础物理学、制造加工工艺的不断提高和新材料、新理论不断创新,激光雷达性能必将得到进一步提升,其应用领域也将越来越广泛,发挥的作用必将越来越大。

## 参考文献:

- [1] ZHANG Jian, ZHANG Lei, ZENG Fei, et al. Development status of airborne 3D imaging lidar systems [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2011, 4(3): 213 - 232. (in Chinese)  
张健, 张雷, 曾飞, 等. 机载激光3D探测成像系统的发展现状[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 213 - 232.
- [2] HU Yihua, SHU Rong. Airborne and spaceborne laser sounding technology and application [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(3): 8 - 13. (in Chinese)  
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(3): 8 - 13.
- [3] MA Liqun, LI Ainong. Review of application of LiDAR to estimation of forest vertical structure parameters [J]. World Forestry Research, 2011, 24: 41 - 45. (in Chinese)  
马利群, 李爱农. 激光雷达在森林垂直结构参数估算中的应用[J]. 世界林业研究, 2011, 24: 41 - 45.
- [4] SUN Guoqing, Ranson K J, ZHANG Zhongjun. Forest vertical parameters from lidar and multi-angle imaging spectrometer data [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(4): 523 - 530. (in Chinese)  
孙国清, Ranson K J, 张钟军. 利用激光雷达和多角度频谱成像仪数据估测森林垂直参数[J]. 遥感学报, 2006, 10(4): 523 - 530.

- [5] PANG Yong ,ZHAO Feng ,LI Zengyuan ,et al. Forest height inversion using airborne lidar technology [J]. Journal of Remote Sensing 2008 ,12( 1) : 152 – 158. ( in Chinese)  
庞勇 赵峰 李增元 ,等. 机载激光雷达平均树高提取研究[J]. 遥感学报 2008 ,12( 1) : 152 – 158.
- [6] YANG Jinchuan ,HUANG Baoku ,ZHANG Zhengyu ,et al. Simulation study of detecting various gases based on far-infrared wide spectrum laser lidar [J]. Laser & Infrared 2013 ,43( 7) : 743 – 746. ( in Chinese)  
杨进川 黄宝库 章正宇 ,等. 宽光谱激光雷达探测多种气体的仿真研究[J]. 激光与红外 ,2013 ,43( 7) : 743 – 746.
- [7] HU Qi ,LI Yuanxiang ,SONG Jinze ,et al. Application of doppler LIDAR data in wind forecasting [J]. Laser & Infrared 2012 ,42( 3) : 268 – 273. ( in Chinese)  
胡琦 李元祥 宋金泽 ,等. 基于多普勒激光雷达的风场预测[J]. 激光与红外 2012 ,42( 3) : 268 – 273.
- [8] LIU Jing ,CHEN Tao ,ZHANG Peizhen ,et al. Illuminating the active haiyuan fault ,China by airborne light detection and ranging [J]. Chinese Science Bulletin 2013 ,58: 41 – 45. ( in Chinese)  
刘静 陈涛 张培震 ,等. 机载激光雷达扫描揭示海原断裂带微地貌的精细结构[J]. 科学通报 2013 ,58: 41 – 45.
- [9] LI Lei ,HU Yihua ,ZHAO Nanxiang ,et al. Application of three-dimensional laser imaging technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress 2009 ,46( 12) : 66 – 71. ( in Chinese)  
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.
- [10] [http://www.paper.edu.cn/index.php/default/release-](http://www.paper.edu.cn/index.php/default/release-paper/content/201102-660)  
paper/content /201102 – 660 [EB/OL].
- [11] YOU Anqing ,HAN Xiaoyan ,LI Shiping ,et al. Transmission lines fitting and towers positioning in LiDAR point cloud [J]. Computer Science ,2013 ,40( 4) : 298 – 300. ( in Chinese)  
游安清 韩晓言 李世平 ,等. 激光点云中输电线拟合与杆塔定位方法研究[J]. 计算机科学 2013 ,40( 4) : 298 – 300.
- [12] WANG Jianyu ,SHU Rong ,CHEN Weibiao ,et al. Chang'e I satellite laser altimeter [J]. Scientia Sinica Physica ,Mechanica & Astronomica ,2010 ,40( 8) : 1063 – 1070. ( in Chinese)  
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.
- [13] GENG Lin ,ZHANG Zhongping. Foreign spaceborne laser application [J]. Laser & Infrared ,2010 ,40( 9) : 919 – 925. ( in Chinese)  
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.
- [14] WANG Shuo ,HE Jin ,YANG Xiaoyou ,et al. Micro-doppler feature analysis in inverse synthetic aperture imaging lidar [J]. Laser & Infrared 2011 ,41( 5) : 506 – 510. ( in Chinese)  
王硕 何劲 杨小优 ,等. 逆合成孔径成像激光雷达微多普勒特征分析[J]. 激光与红外 ,2011 ,41( 5) , 506 – 510.
- [15] XIONG Bing. FMCW LIDAR is applied to the research in noninvasive blood glucose measurement [D]. Hangzhou: Zhejiang University 2011. ( in Chinese)  
熊冰. 调频连续波激光雷达( FMCW LIDAR) 应用于无创血糖检测的探索研究[D]. 杭州: 浙江大学 2011.