

文章编号: 1672-8785(2009)07-0005-05

激光雷达与高光谱遥感对地立体探测研究

李先华 黄睿 黄微

(上海大学通信与信息工程学院遥感与空间信息科学研究中心, 上海 200072)

摘要: 将激光雷达对大气、水体的透视及对地精确测距定位的立体成像探测能力和高光谱技术相结合, 发展先进的空、天基对地立体成像综合定量探测系统, 是国家对大气、陆地和海洋精确立体综合定量探测的迫切需要, 也是遥感技术自身发展进步的要求。激光与地面、水体和大气的相互作用及其在高光谱的遥感响应是空、天基激光雷达和高光谱对地立体成像综合定量探测的核心理论基础和关键科学问题。

综述了激光雷达对地探测系统的研究现状和发展趋势。提出了新的基于激光雷达与高光谱遥感的对地立体探测系统。将激光雷达对大气、水体的透视以及对地的精确测距定位与高光谱技术相结合, 介绍了该系统的原理方法和特点。从激光雷达和高光谱数字影像的广义大气修正和地形辐射改正, 大气光学厚度与程辐射图像的生成, 激光雷达的非均匀水体修正和水底地形改正, 激光雷达和高光谱与介质以及目标的相互作用, 多源数据融合等五个方面阐述了该体系的关键技术及其研究思路。

关键词: 激光雷达; 高光谱; 对地立体探测

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

Research on Tridimensional Ground Exploration Based on LIDAR and Hyperspectral Remote Sensing

LI Xian-hua, HUANG Rui, HUANG Wei

(Research Center of Remote Sensing and Spatial Information Science, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: To develop an advanced air- and space-based quantitative stereo imaging earth detection system by integrating a Light Detection and Ranging (LIDAR) system with a hyperspectral technology is an urgent need for our country to monitor atmosphere, land and ocean quantitatively. The correlation of the laser with the land, water and atmosphere and its remote response in hyperspectra are the core theoretical basis of the air- and space-based quantitative stereo imaging earth detection system.

The current status and development trend of the LIDAR earth detection system are overviewed. A new stereo earth detection system based on a LIDAR system and a hyperspectral remote sensing technology is proposed. Its operation principle and characteristics are presented. The key techniques and research ideas of the system are described in the following five aspects: the generalized atmospheric and topographic radiation correction of LIDAR and hyperspectral images, the generation of the images of

收稿日期: 2009-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(40771145); 高等学校博士点基金(20070280011); 气象行业专项项目(GYHY20070628)

作者简介: 李先华(1948-), 男, 四川自贡人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为遥感与地理信息系统。E-mail: lxhc@ yahoo.com.cn

aerosol optical path and path radiation, the non-uniform water and underwater topographic correction of LIDAR, the correlation of LIDAR and hyperspectral signals with media and targets and the multi-source data fusion.

Key words: LIDAR; hyperspectral imaging radiometer; stereo earth detection

1 引言

传统的对地探测(常规航摄系统和卫星遥感,包括一般高光谱成像和微波)的局限和缺陷是难以有效地对大气和水下进行精确定量探测、直接测距和定位。传统的对地探测已经越来越难以满足当前和今后社会经济和科学技术发展对大气、地面(水面)和水下、水底的高精度、深层次空间数据日益增长的巨大需求。

激光雷达对地探测系统所获取的地球表面信息有两种:空间位置(距离)和影像(性质)。两者共同构成完整的机载激光对地探测系统。目前,机载激光雷达探测系统的主要作用是探测地面的高程信息。如果激光雷达的地面采样点充分密集并且同时获取激光回波信息,就可以不用被动式光电成像,直接以激光雷达回波强度数据获得地面数字扫描激光影像(目标表面特性),在同时获取的地面高程信息的支持下还可进一步生成地面的实时三维立体影像;研究地表因大气散射、吸收、衰减、消光和地面反射率影响导致的激光雷达回波性质和强度的变化。通过测量入射辐射的变化反演大气组分和气溶胶粒子的数量和特性,就可以进行激光雷达区域的大气遥感探测。通过研究海洋激光雷达回波的性质、形态和强度的变化,可以进行激光雷达区域的海洋(如:海水透明度、泥沙和叶绿素含量、海洋环境污染和海洋资源调查等)遥感探测;在一定的条件下,还可以利用水面和水底两次反射信息(双频技术)以及水体对激光的衰减(散射和吸收),探测水底地形、水深和水体性质并实现水下三维立体成像。

2 激光雷达探测系统的研究现状与发展趋势

目前,国外的机载激光雷达探测系统已具备对地综合探测能力,有些系统已成功地进行了

火星、月球和地球形状的探测。美国、加拿大、澳大利亚、瑞典等国为浅海地形测量发展的低空机载系统,是通过用机载激光测距设备、全球定位系统(GPS)、陀螺稳定平台等直接进行测距与定位而最终得到浅海地形的。比较典型的是美军现在使用的一种独具特色的激光雷达水下地形测量系统(SHOALS)^[1],它是采用激光雷达技术远距离测量浅海深度、测绘海岸带的地形和监测海岸侵蚀的。目前国外70%的对地(浅海、水下)地形探测都由机载激光雷达完成,其效率高于传统探测方法100倍以上。最近,挪威水文地理机载公司研发的水下测量和陆地地形测量鹰眼II机载激光雷达系统可以同时进行陆域及海域地形测量。鹰眼II内装有与激光头共轴的高分辨率相机,它能在一次飞行任务中同时完成海洋深测和地形高程测量,具有无缝连接的特点。

在星载激光雷达方面,人们已开展了基于星载激光雷达进行遥感图像的几何定位、测距^[2,3]、气溶胶反演^[4,5]以及云层高度探测^[4,6]等研究。

在国内,华中科技大学研制了机载激光雷达并完成了南海洁净海水水下目标探测实验^[7];中国科学院上海光机所研制了机载激光雷达(海测型)并完成了南海洁净海水、水下地形探测实验;中国科学院遥感所和上海技术物理研究所合作利用上海技术物理研究所研制的机载激光雷达系统(陆测型)和激光高度计成功地进行了高精度的城市地形测量和月球表面地形测量。国内一些单位近期利用机载高光谱图像和LiteMapper 5600激光雷达(陆测型)高精度对地探测系统分别在广西以及西藏布达拉宫地区实施了高精度的对地探测。中国林业科学研究院利用该设备在山东地区进行了林业探测实验。另外,香港和台湾地区也利用国外的机载激光雷达设备进行了地形探测实验。

3 激光雷达和高光谱对地立体探测的原理方法及其特点

空、天基激光雷达和高光谱对地探测系统本身可获取点对点的高光谱影像数据和激光雷达数据，方便了后续的影像匹配和信息融合。目前，国外已有的机载激光雷达成像系统对每个激光点都能提供姿态、距离、反射率、影像数值等六维信息。这说明立体探测系统在硬件实现上是可行的。

立体探测系统充分利用激光雷达对大气、水体的穿透能力和高精度测距和空间定位的优势，通过消除非均匀大气、水体和地面、水底地形的影响，建立大气 / 水体程辐射、大气 / 水体光学厚度遥感数字图像和水面、水底正射影像。通过三维数字重建，便可获得地面、水面和水底的数字地形图、数字地面模型和数字立体影像。研究探测目标的波谱特性和空间形态，建立相应的遥感反演和模式识别模型，对完成空、天基激光雷达对地成像立体探测的原理方法研究是有帮助的。

高光谱的波谱分辨率和空间分辨率高，探测的波谱范围广，但不具备精确测距、定位功能；激光雷达能量集中，单色性好，可实现全天候精确测距和定位。因此，激光雷达和高光谱的结合是主动和被动遥感优势的互补。

利用机载激光雷达和高光谱图像中每个像素的高精度高程数据（由激光雷达提供）可构建高精度的数字地形图和数字地面模型。此外，利用地基激光雷达系统的高精度大气探测和激光雷达“双频”技术，并结合每个像素的激光雷达强度数据，还可进行大气、海洋、湖泊和河流的水深、水下地形、水体泥沙含量和水体参数（包括海洋次表面温度、密度、绿色和黄色物质浓度）等探测。

对地目标探测的主要遥感依据是特定环境中目标的波谱特性和几何形状。其中目标的波谱特性是决定目标性质的最本质的遥感物理基础，而目标的几何形状则是目标的时间、空间分布和表达。目标探测主要有：基于目标波谱特性和目标几何形状以及二者相结合的三种基本模式。激光雷达和高光谱相结合的对地立体探测为实现上述三种遥感探测模式提供了可能。

4 激光雷达和高光谱对地立体探测的关键技术

激光与地面、水体、大气的相互作用及其在高光谱的遥感响应是空、天基激光雷达和高光谱对地立体成像综合定量探测的核心理论基础和关键科学技术，具体体现在以下五个方面。

4.1 激光雷达和高光谱数字影像的广义大气修正和地形辐射改正

激光雷达和高光谱数字影像的广义大气修正过程是^[9]：在计算激光雷达和高光谱数字影像各点的大气透过率、大气程辐射和消除两类影像的大气程辐射后，将其换算成星下点透过率的影像数值。

激光雷达和高光谱数字影像的地形辐射改正过程是^[10]：利用激光雷达的测距数据建立地面、水面和水底的数字地形图和高程模型，研究成像瞬间激光雷达和高光谱数字影像数据与地面地形之间的定量关系，分别建立地形辐射改正模型，将激光雷达和高光谱数字影像上各点的影像数值校正为地面水平时激光、太阳光照射角度相同的影像。

经过大气修正和地形校正处理的激光雷达和高光谱数字影像可视为各点在地面激光、太阳光照度相同，大气、地形状况一致的最佳成像条件下得到的激光雷达和高光谱数字图像。理论上，这才是真正的正射影像。这样的数字影像最大程度地消除了因距离、地形和大气状况对激光雷达和高光谱数字影像的影响，充分表达了地物的波谱特性，提高了激光雷达和高光谱对地球表面物质的系统探测能力，改善了激光雷达和高光谱数字图像的质量以及数字虚拟仿真能力。

4.2 大气光学厚度与程辐射图像的生成

大气、地形除了对原始激光雷达和高光谱数字影像形成干扰之外，其自身也载有信息。大气修正所分离的大气信息可以用于大气探测；地形改正所损失的地形信息则可从激光雷达提供的地物三维位置信息中获取。

经过非均匀大气修正的激光雷达数字图像增强了对地特别是对水体浑浊度、叶绿素、泥

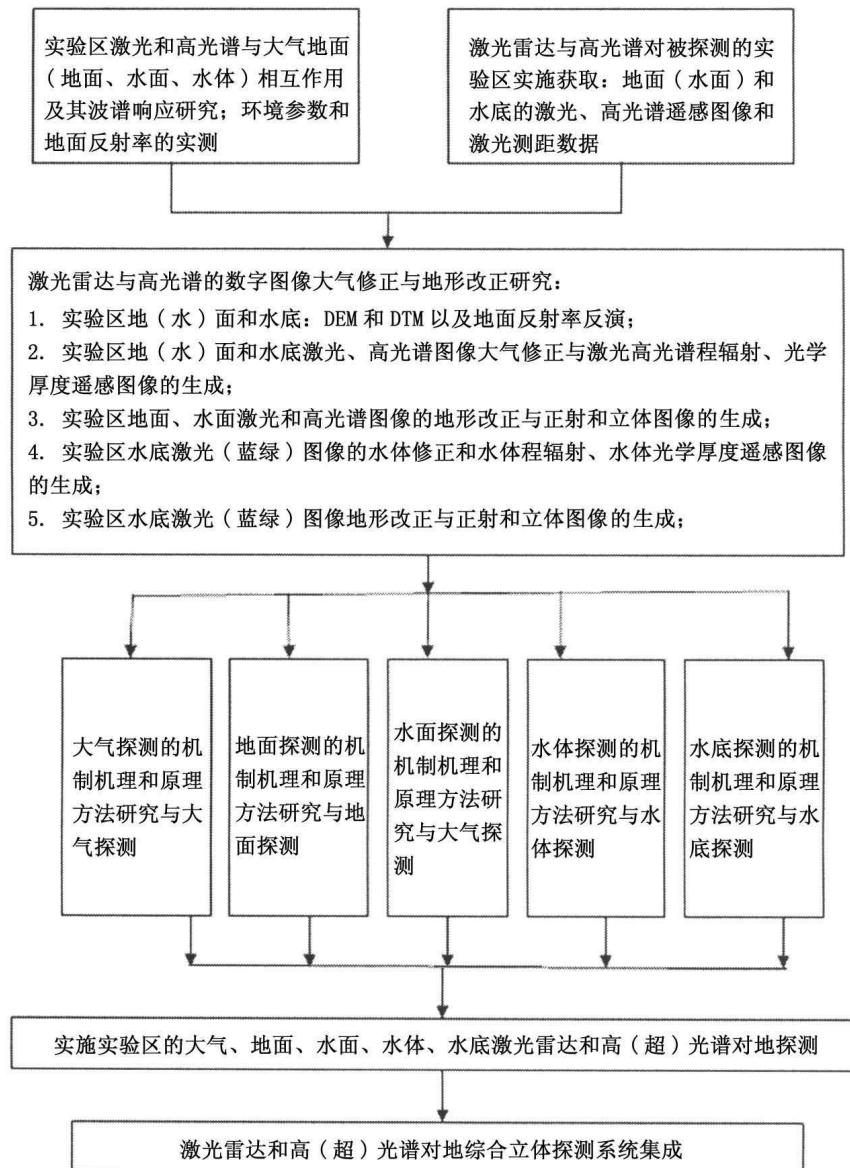


图1 总体方案流程图

沙和悬浮物等的探测能力。同时还可以进一步利用非均匀大气修正的中间成果对激光雷达和高光谱遥感数字影像进行弱信息挖掘和提取，以生成大气光学厚度、大气程辐射等遥感数字图像。在此基础上可衍生和发展出先进、科学的大气探测和大气污染监测新方法、新原理和新技术。文献[11]提出了在大气污染地面观测数据(可吸入颗粒物PM10浓度)的支持下利用MODIS图像生成大气程辐射遥感数字图像的方法，并以上海为例进行了城市大气污染遥感监测研究。该方法经改进后可用于激光雷达数字影像。

4.3 激光雷达的非均匀水体修正和水底地形改正

利用激光雷达的“双频技术”进行透明水体水下地形和水深探测是广泛采用的成熟技术。激光雷达数字图像非均匀大气修正的原理方法同样可应用于水下激光雷达数字图像的非均匀水体修正，以生成水下激光雷达数字影像的水体光学厚度、水体程辐射等水体激光遥感数字图像。

经过非均匀水体修正的激光雷达数字影像同样可以利用水下地形图(数字地面模型)进行水下激光雷达成像的水底地形改正，以生成水下激光雷达成像的水底正射影像。同样，也可在没有非均匀大气和非均匀水体干扰的水底激光

雷达正射影像和水下激光雷达三维立体成像的基础上进行水底探测。

4.4 激光雷达和高光谱与介质以及目标的相互作用

激光雷达与介质(大气、水)和目标的相互作用及其高光谱的遥感响应机制,特别是空、天基激光雷达对地探测的激发荧光及其高光谱遥感响应的机制机理是激光雷达和高光谱探测目标物质种类、成分、结构的理论基础和依据。

激光、高光谱与大气、地面、水面、水体和水底的吸收、透过、反射、散射等相互作用,是空、天基激光雷达和高光谱对地立体成像综合探测的理论基础。以波长为532nm和1064nm的激光为例,通过研究其在传输过程中与介质和目标的相互作用及其在雷达和高光谱遥感图像上的响应机制,在此基础上再研究激光雷达和高光谱的数字图像的大气、地面、水面、水体和水底探测与环境参数定量反演的原理和方法,便可为空、天基激光雷达对地立体综合定量探测提供理论依据。

4.5 多源数据的融合

由于每个像素匹配了高精度的高程数据,在此基础上,可以完成高光谱影像和激光雷达数字影像之间的匹配与合成,还可进一步进行机载高光谱影像和激光雷达数据与微波雷达图像、热场、重力场、磁场资料的多源信息融合,以及进行机载高光谱影像的三维立体影像的构建和地面目标信息的识别与提取等。

本研究的总体方案框图如图1所示。

5 结束语

当前,受空、天基激光探测技术水平(主要是硬件)的限制,所获得的对地立体探测数据及其处理信息有不尽完善之处,但这并不影响我们对空、天基激光雷达对地立体成像探测的科学、技术、原理、方法的探索和准备。事实证明,现

有的激光技术和高光谱技术已经能满足我们以空、天基激光雷达为主进行对地立体探测原理和方法研究的基本条件。随着激光雷达和高光谱技术的进步,包括空间技术和信息处理技术以及高密度能源的应用,随着对激光与目标的相互作用及其高光谱响应机制认识的不断深入,相信一个以激光雷达为主体,与高光谱相结合的新型、高效、高精度、逐渐成熟的“空、天基对地立体探测系统”将会很快出现在遥感领域中。

参考文献

- [1] Guenther G C, Brooks M W, LaRocque P E, et al. New capabilities of the “SHOALS” airborne lidar bathymeter [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, **73**: 247–255.
- [2] 周淑芳, 李增元, 范文义, 等. 基于机载激光雷达数据的DEM获取及应用 [J]. *遥感技术与应用*, 2007, **22**(3): 356–360.
- [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.
- [4] 刘刚, 史伟哲, 尤睿. 美国云和气溶胶星载激光雷达综述 [J]. *航天器工程*, 2008, **17**(1): 78–84.
- [5] 邓涛, 张镭. 利用激光雷达探测高云对气溶胶辐射效应的影响 [C]. 中国气象学会2007年年会大气成分观测、研究与预报分会场论文集, 2007: 386–395.
- [6] 张娜, 郭龙, 刘雅娟. 经验模式分解方法在大气边界层高度提取中的应用 [J]. *科技信息(科学教研)*, 2008, **18**: 503–504.
- [7] 冀航, 马泳, 杨克成. 载波调制激光雷达水下目标探测的仿真分析 [J]. *光学术报*, 2007, **33**(5): 648–653.
- [8] 夏珉, 杨克成, 郑毅, 等. 水体光学参数对水中气泡场激光雷达探测影响的研究 [J]. *激光杂志*, 2008, **29**(1): 72–74.
- [9] 李先华, 兰立波, 池天河, 等. 卫星数字图像的非均匀大气修正研究 [J]. *遥感技术与应用*, 1994, **9**(2): 1–7.
- [10] 李先华. 遥感信息的地形影响与改正 [J]. *测绘学报*, 1986, **15**(2): 102–109.
- [11] 李先华, 徐丽华, 曾齐红, 等. 大气程辐射遥感图像与城市大气污染监测研究 [J]. *遥感学报*, 2008, **12**(5): 15–20.