星载激光测高地面数据处理设计研究

李彬彬[1],谢　欢[1],童小华[1],张志杰[1,2]
(1.同济大学 测绘与地理信息学院,上海200092;2.河南理工大学 测绘与国土信息工程学院,河南 焦作454000)

摘　要: 星载激光测高技术是对地观测系统中最为核心和前沿的信息获取技术之一,因其具有探测方向性好、测距精度高等特点,在地球科学领域中体现出了巨大的应用潜力。在ICESat/GLAS测高地面数据处理系统的基础上,针对将于今年发射的高分七号卫星的载荷特点,设计了一套星载激光测高地面数据处理系统软件。该软件可实现对星载激光测高数据的地面处理并生成3级数据产品,包含激光能量计算、波形分解和激光脚点定位等,以及相应各级产品的数据质量控制处理。利用高分七号仿真数据对该软件进行相应的性能测试,测试结果表明:该系统软件基本满足需求,已初步具备星载激光测高地面数据处理能力。

关键词: 激光测高;高分七号;软件设计;波形分解;激光脚点定位
中图分类号: P 237;TP 751　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.01.017

Research on the Design of Ground Data Processing for Satellite-Borne Laser Altimetry

LI Binbin[1], XIE Huan[1], TONG Xiaohua[1], ZHANG Zhijie[1,2]
(1.College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2.School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China)

Abstract: Satellite-borne laser altimetry is one of the most important and advanced information acquisition technologies in the earth observation system. It has shown great application potentials in the field of earth science because of its characteristics such as good detection direction and high ranging accuracy. Based on the ICEsat/GLAS altimetry ground data processing system and in terms of the load characteristics of the Gaofen-7 (GF-7) satellite which will be launched this year, a set of system software for the ground data processing of satellite-borne laser altimetry is designed. The software can process the ground data of satellite-borne laser altimetry and generate level-3 data products, including laser energy calculation, waveform decomposition, laser footprint positioning, as well as the data quality control and processing of the corresponding products at all levels. The simulation data of GF-7 are used to test the performance of the software. The results show that the system software basically meets the requirements, and has the preliminary capability of processing the ground data of satellite-borne laser altimetry.

Key words: laser altimetry; GF-7; software design; waveform decomposition; laser footprint positioning

0　引言

早在20世纪60年代,星载激光雷达就已被美国应用于月面测距,并在随后被应用于火星、水星、小行星等行星表面高程探测。我国的“嫦娥一号”到“嫦娥三号”、日本的月亮女神探测器、印度的“月球初航-1”卫星等也都搭载过用于测量月球表面地形的激光测高仪。而在对地观测方面,除一些实验性的载荷之外,由美国国家航空航天局发射的ICESat卫星的激光测高仪GLAS是全球第一个星载卫星激光测高系统,目前已停止工作。作为其第二代卫星,ICESat-2卫星[1]于2018年成功发射,目前处于测试标定阶段,在2019年对外正式发布数据。

收稿日期: 2019-02-26;**修回日期:** 2019-04-05
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41822106,41571407);高分辨率对地观测系统重大专项资助项目(11-Y20A12-9001-17/18);上海市科技创新行动计划资助项目(18511102100);上海市曙光计划资助项目(18SG22)
作者简介: 李彬彬(1991—),男,博士研究生,主要研究方向为卫星激光测高。
通信作者: 谢　欢(1983—),女,博士,教授,主要研究方向为卫星激光与高光谱遥感。

ICESat/GLAS的测高精度约为4～15 cm,工作期从2003—2009年,获取了共计18个任务期的激光测高数据[2-3]。其主要科学目标为测量南北极冰盖高程和海冰的变化、云和气溶胶高度,以及地形和植被特征参数[4]。该卫星通过激光器同时发射532 nm和1 064 nm两个波段的激光,已广泛应用于极地冰盖的高程精密监测[5-8]、极地冰下湖活动[9]、森林冠层提取[10-11]等。

我国除了2016年5月发射的“资源三号02星”搭载的试验性激光载荷之外,在“高分”系列卫星中,尚有计划于2019年发射“高分七号”(GF-7)卫星。该卫星是高分辨率立体测绘卫星,其主要有效载荷包括立体测绘相机和激光测高仪(多波束,附带足印相机等)等。本文在借鉴ICESat/GLAS测高地面数据处理软件系统的基础上,针对GF-7卫星激光测高仪特点,设计一套星载激光测高地面数据处理软件系统并展开测试,为GF-7卫星数据的高精度几何处理、地表高程和地物高度信息的精确提取及其变化监测提供支撑技术。

1 星载激光测高地面数据组成

星载激光测高系统的数据主要包括了时间系统数据、激光系统数据、定轨系统数据、定姿系统数据以及激光光束指向系统数据等。以GLAS为例,星载晶体振荡器和由星载GPS设备测量解算出的GPS时间信息,组成了主要的时间系统数据;激光发射器发射的1 064 nm激光,经望远镜、探测器及模数转换器等设备处理后,生成了激光系统数据;星载GPS设备测量和解算出的GPS定位信息,在过境地面测站时与激光角反射器评估信息的共同作用下,可提供卫星精确定轨数据[12];星敏感器(Instrument Star Trackeer,IST)在获得卫星平台相对于天球坐标系的姿态数据后,结合惯性参考单元(Inertial Reference Unit,IRU)中陀螺仪(Hemisperical Resonator Gyros,HRG)测量的数据,以及采用扩展卡尔曼方法内插,生成了卫星定态数据;激光参考相机(Laser Reference Camera,LRC)和激光轮廓阵列(Laser Profiling Array,LPA)各自的激光光束成像、激光参考传感器(Laser Reference Sensor,LRS)的观测图像、校准参考源(Collimated Reference Source,CRS)的辅助校准以及姿态系统共同作用下,提供了激光光束指向系统数据[13-14]。而作为我国民用领域第一台业务化运行的星载激光测高GF-7卫星,其载荷数据还包括了足印相机和立体测绘相机的影像数据等。

伴随着系统数据的生成,诸如仪器(主/备)使用情况、仪器属性参数(如温度、供电电压等)以及星上处理生成这些数据所使用算法的辅助信息(如探测信号门限值、先验DEM等)都需要分析整理,以便在相应的算法处理中作为参数值输入或质量标签依据。特别对于激光系统数据而言,由于激光脉冲在地球大气层传输过程中,与大气的气体分子和大气气溶胶粒子、尘埃、雾、雨、雪等接触而产生的测距误差,以及因潮汐影响而导致的脚点定位误差,需要对其进行相应的大气潮汐模型改正[15]。

综上所述,星载激光测高地面数据具有种类繁多、分散且数据量大等特点,而卫星激光测高的精度是卫星时间系统、轨道定位、姿态确定、激光指向、测距精度等关键要素共同作用的结果。因此,需要设计一套激光卫星测高地面数据处理系统对数据进行整理、评价、筛选及解算,最终形成可供应用单位使用的激光数据产品体系。

2 星载激光测高地面数据处理系统设计

如图1所示,星载激光测高地面数据处理系统在用户界面中提供两种数据处理模式,分别为对单条数据记录进行分析的主界面模式和对数据精细批量处理的批处理界面模式。而在算法处理上,则包含了4个数据处理模块,分别为1级激光数据处理模块、2级激光数据处理模块、3级激光数据处理模块和质量控制处理模块。其中,1级激光数据处理生成激光测高产品,2级激光数据处理生成激光波形产品,3级激光处理生成激光定位产品。各级的质量评价指标,如发射波和回波信号是否过门限值标志,回波信噪比、波形分解拟合等都伴随各级激光数据处理后产生,而各级激光数据整体的质量控制则由质量控制处理模块提供。

2.1 1级激光数据处理模块

1级激光数据处理模块主要功能是对原始激光数据包进行整理和初步分析,包括预处理、能量计算、卫星轨道位置计算等,生成包括数据识别号(ID)、发射波能量、回波(最大峰值、全波)能量和卫星轨道位置等激光测高产品。

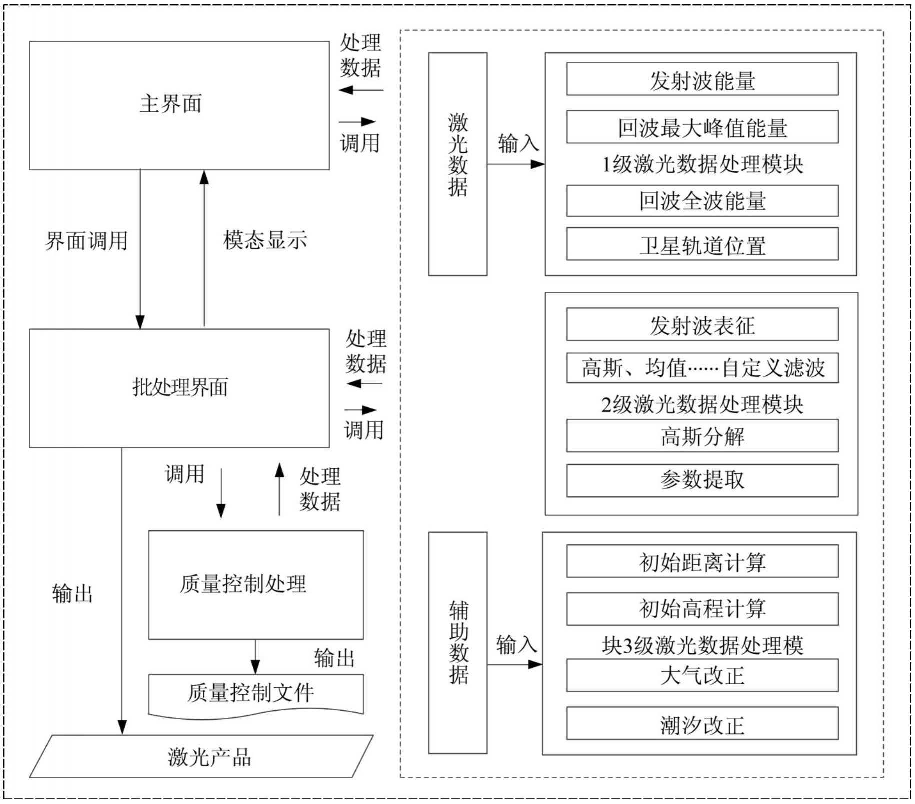

图 1　总体设计

Fig.1　General design of the system

2.2　2 级激光数据处理模块

2 级激光数据处理模块主要功能是对经过 1 级激光数据处理模块后的波形数据进行处理,包括发射波表征[15]、回波平滑滤波[15-16]、回波高斯分解[15]、波形参数提取[17-21]等,生成包括发射波表征参数、回波高斯分解结果、波形参数(主要包括波形全高、波形长度、波峰长度和半波能量高等)等激光波形产品。

2.3　3 级激光数据处理模块

3 级激光数据处理模块的功能主要是围绕激光地面脚点定位的计算,即对经过 2 级激光数据处理模块处理后得到的数据进行包括激光到达地面点的初始距离计算[15]、初始激光地面脚点定位[13,22-24]、大气改正[25]和潮汐改正[26]等,生成包括初始距离、激光地面脚点定位的三维坐标值、大气改正值和潮汐改正值等激光定位产品,主要处理流程如图 2 所示。

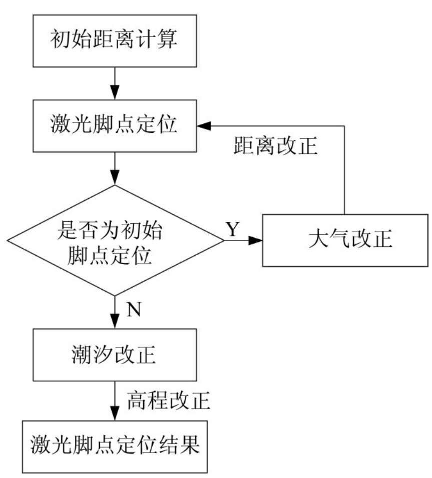

图 2　激光地面脚点定位主要处理流程

Fig.2　Main processing flow of the laser ground footprint positioning

2.4　质量控制处理模块

质量控制处理模块主要是针对时间段内(或沿轨距离内)的激光数据集进行整体的数据产品综合评价。该处理模块在两种用户界面交互中,只由批处理界面所调用并产生相应的质量控制文件。内

容上主要包括检测各类数据(如波形数据、影像数据、辅助信息数据等)的缺失情况,以及统计分析相关信息值(如时间信息、卫星位置信息、波形相关属性信息等)。通过该模块生成的质量控制文件,可以更加全面地分析某段时间内的激光数据,并依据相应的数据应用质量需求对数据进行选择。

3 星载激光测高地面数据处理系统性能测试

打开程序,将显示程序的主界面,如图3所示。通过导入星载激光测高地面数据,将可以开始对数据展开逐级数据模块处理和分析。为此,程序为逐级数据处理模块的处理结果提供4种不同的显示视图,分别为波形视图、地图视图、影像视图及分析视图。其中,波形视图专门为波形的各类处理结果提供波形数据显示,地图视图专门为卫星轨道位置及激光脚点定位在世界地图范围内提供位置显示,影像视图专门为足印相机等各类辅助分析的影像提供影像显示,分析视图则是为所有文本形式的处理结果提供文本显示。

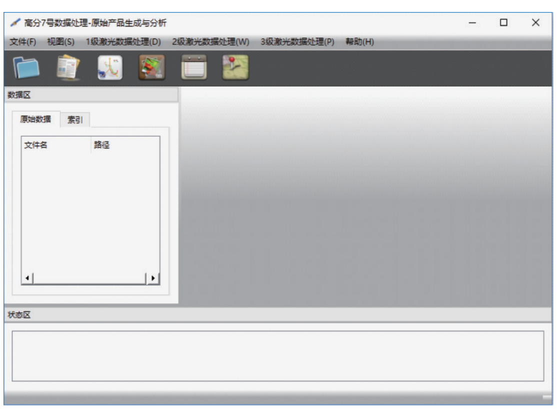

图3 软件主界面

Fig.3 Main interface of the software

作为软件运行测试例子,本文选用模拟数据中某条数据记录进行分析。图4显示了该条数据记录经过3级激光数据处理模块后的主要分析结果,包括地面数据包中足印相机影像在影像视图中的显示,1级激光数据处理模块中卫星位置计算在分析视图中的结果,2级激光数据处理模块中对波形进行平滑滤波及高斯分解后在波形视图中的结果,以及3级激光数据处理模块中脚点定位计算后在地图视图中的显示结果。

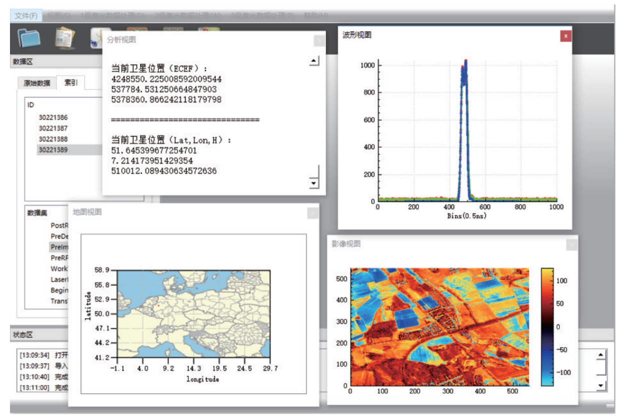

图4 1~3级激光数据处理结果示意图

Fig.4 Diagram of processing results of the levels 1-3 laser data

作为另一种用户界面交互模式,批处理界面向用户提供了4个参数输入子模块,以及信息总览子模块,如图5所示。

图5 批处理界面

Fig.5 Interface of batch processing

4个参数输入子模块分别为文件导入子模块、波形分析子模块、脚点定位子模块、误差修正子模块。用户导入数据由文件导入子模块提供入口。由于1级激光处理模块的参数主要为仪器属性参数,因此,不对用户开放。2级激光处理模块中的平滑滤波方法及滤波窗口大小的旋转对用户开放,由波形分析子模块中提供入口。3级激光处理模块中的激光脚点定位涉及的J2000转WGS84矩阵数据文件路径由脚点定位子模块提供入口,大气改正数

据文件路径及潮汐改正数据文件路径由误差修正子模块提供入口。信息总览子模块对用户在前4个子模块中的输入参数总信息汇总,方便用户对输入参数进行整体检查确认。经过批处理界面处理的数据将生成对应的产品文件和质量控制文件。其中,产品文件中每一条记录的内容形式与主界面处理后的内容形式相同,质量控制文件为文本格式。

目前,由于GF-7号尚未发射,其实际激光测高精度还有待进一步验证。在星载激光测高仿真实验测试中,当卫星轨道高度为500 km,激光地面脚点位于平坦地区(坡度小于3°),指向角误差小于10 μrad,并且其他误差项(硬件系统误差项、大气潮汐误差改正项、粗糙度误差改正项等)改正后对高程造成的误差控制在20 cm以内时,测高精度可优于1 m。

4 结束语

本文在研究了ICESat/GLAS测高系统软件的基础上,针对GF-7号卫星的特点,开展了星载激光测高地面数据系统软件的设计并对其进行测试。该系统能够较好地兼顾用户在星载激光测高地面数据分析及其产品批量处理两方面的需求。同时,在星载激光雷达测高仿真实验测试中,平坦区域的高程精度最高可优于1 m。随着GF-7号发射在即,本文所研究的星载激光测高地面数据系统将对GF-7号激光测高地面数据的处理具有一定的参考意义。由于GF-7号尚未发射,软件系统的设计仅立足于其部分公开的资料,后续工作还要依据实际GF-7号的星载激光数据,对现有的软件框架进行修正。

参考文献

[1] ABDALATI W, ZWALLY H J, BINDSCHADLER R, et al. The ICESat-2 laser altimetry mission [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5):735-751.

[2] BRENNER A C, DIMARZIO J P, ZWALLY H J. Precision and accuracy of satellite radar and laser altimeter data over the continental ice sheets [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(2):321-331.

[3] 李建成,范春波,褚永海,等.ICESAT卫星确定南极冰盖高程模型研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2008,33(3):226-228.

[4] 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):405-445.

[5] SHEPHERD A, IVINS E R, VALENTINA G A, et al. A reconciled estimate of ice-sheet mass balance [J]. Science, 2012, 338(6111):1183.

[6] ZWAALLY H J, LI J, ROBBINS J W, et al. Mass gains of the Antarctic ice sheet exceed losses [J]. Journal of Glaciology, 2017, 61(230):1019-1036.

[7] XIE H, HAI G, CHEN L, et al. Antarctic ice sheet surface mass balance estimates from 2003 to 2015 using ICESat and CRYOSAT-2 data [C]// International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016, XLI-B8:549-553.

[8] XIE H, LI R, TONG X, et al. A comparative study of changes in the Lambert Glacier/Amery Ice Shelf system, East Antarctica, during 2004 - 2008 using gravity and surface elevation observations [J]. Journal of Glaciology, 2016, 62(235): 888-904.

[9] SMITH B E, FRICKER H A, JOUGHIN I R, et al. An inventory of active subglacial lakes in Antarctica detected by ICESat (2003 - 2008) [J]. Journal of Glaciology, 2009, 55(192):573-595.

[10] SUN G, RANSON K J, KIMES D S, et al. Forest vertical structure from GLAS: an evaluation using LVIS and SRTM data [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(1):107-117.

[11] POURRAHMATI M R, BAGHDADI N N, DARVISHSEFAT A A, et al. Capability of GLAS/ICESat data to estimate forest canopy height and volume in mountainous forests of Iran [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(11):5246-5261.

[12] RIM H, SCHUTZ B. Precision orbit determination (POD) [R]. GLAS Algorithm Theoretical Basis Document, Version 2.2, 2002.

[13] BAE S, SCHUTZ B E. Precision attitude determination (PAD) [R]. Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) Algorithm Theoretical Basis Document, Version 2.2, NASA, 2002.

[14] 刘付成,朱东方,黄静.空间飞行器动力学与控制研究综述[J].上海航天,2017,34(2):1006-1630.

[15] BRENNER A C, ZWALLY H J, BENTLEY C R, et al. Derivation of range and range distributions from laser pulse waveform analysis for surface elevations, roughness, slope, and vegetation heights [R]. GLAS Algorithm Theoretical Basis Document, Version 3.0,

2011.

[16] HOLLAUS M, WAGNER W, EBERHÖFER C, et al. Accuracy of large-scale canopy heights derived from LiDAR data under operational constraints in a complex alpine environment [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 60(5):323-338.

[17] DRAKE J, DUBAYAH R, CLARK D, et al. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2):305-319.

[18] HARDING D J. ICESat waveform measurements of within-footprint topographic relief and vegetation vertical structure [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(21):L21S10.

[19] DUONG H V. Processing and application of ICESat large footprint full waveform laser range data [D]. Delft: Delft University of Technology, 2010.

[20] LEFSKY M A, HARDING D J, KELLER M, et al. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICEsat [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(22):L22S02

[21] KELLER M. Revised method for forest canopy height estimation from Geoscience Laser Altimeter System waveforms [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2007, 1(1):013537.

[22] SCHUTZ B E. Laser footprint location (geolocation) and surface profiles [R]. GLAS Algorithm Theoretical Basis 1190 Document, Version 3.0, 2002.

[23] 唐新明,李国元,高小明,等.卫星激光测高严密几何模型构建及精度初步验证[J].测绘学报,2016,45(10):1182-1191.

[24] 黄朝围,何赟晟,孙凯鹏,等.星载线阵CCD相机与激光测高仪无控定位精度对比分析[J].上海航天,2018,35(5):92-99.

[25] HERRING T A, QUINN K J. The atmospheric delay correction to GLAS laser altimeter ranges [R]. GLAS Algorithm Theoretical Basis Document, 2012.

[26] FRICKER H A, RIDGWAY J R, MINSTER J B, et al. Tidal corrections [R]. GLAS Algorithm Theoretical Basis Document, 2012.

(上接第 118 页)

[5] NEFFL K, ANFLO K, MÖLLERBERG R, et al. High performance green propellant for satellite applications [R]. AIAA 2009-4878, 2009.

[6] ROBERT S. HAN-based monopropellant assessment for spacecraft [R]. AIAA, 96-2863, 1996.

[7] QIU X, LIU J, LIN Q G. Research progresses on green propulsion technology for HAN-based propellant [C]// 65th International Astronautical Congress. 2014: C4.1.1.

[8] 刘川,赵峰,刘俊.HAN基无毒单组元1 N发动机设计研究[J].上海航天,2016,33(4):32-37.

[9] LIN Q G, LIU C, LIU J. Development on HAN-based monopropellant thruster [C]// 4th Space Propulsion Conference. 2014:2980755.

[10] LIU J, LIU C, QIU X, et al. Towards satellite propulsion with HAN-based green monopropellants [C]// 5th Space Propulsion Conference. 2016: 3124923.

[11] 郭舜,闵桂荣.航天器热控制[M].北京:科学出版社,1998.

[12] WALES R O. AST-6 final engineering performance report [R]. NASA, 1981.

[13] 李曙,李诗卓,段德莉,等.小型姿、轨控推力器热控用微型铠装电加热器的研制[C]//第五届空间热物理会议.2000:420-425.

[14] CHANG Y P. Combustion behavior of HAN-based liquid propellants [D]. University Park, PA: The Pennsylvania State University, 2002.

[15] 李小芳.无毒单组元发动机技术研究[J].上海航天,2001,26(3):26-35.