

引用格式:Gao Le,Liao Jingjuan,Liu Huanling,*et al.* Applying Status and Development Tendency of Satellite Radar Altimeter[J]. Remote Sensing Technology and Application,2013,28(6):978-983. [高乐,廖静娟,刘焕玲,等. 卫星雷达测高的应用现状及发展趋势[J]. 遥感技术与应用,2013,28(6):978-983.]

卫星雷达测高的应用现状及发展趋势

高 乐^{1,2},廖静娟¹,刘焕玲³,郭 伟⁴

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所,北京 100094;2. 中国科学院大学,北京 100049;
3. 武汉大学测绘学院,湖北 武汉 430079;4. 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉 430079)

摘要:进入新世纪以来,卫星雷达测高技术迅速发展,部分领域已进入业务化实施阶段,目前表现出了新的发展趋势。详细介绍了卫星雷达测高在海洋、陆地水体、冰川和测绘上的应用,并对目前测高技术存在的一些问题进行了分析。我国在雷达测高领域与西方发达国家还有很大差距,及时加强在该领域的研究非常必要。
关 键 词:雷达测高;海洋;陆地水体;冰川;测绘
中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2013)06-0978-06

1 引 言

卫星测高由于其具有快速的全球覆盖能力,能够从宇宙空间大范围、高精度、周期性地探测海洋和陆地的各种现象及其变化,在研究全球地球重力场模型、精化大地水准面,研究大洋环流、海平面变化、岩石圈断裂带和大尺度海底地形以及陆地湖泊、河流、冰川等,具有其他手段无法比拟的技术优势^[1]。
经过 40 a 的发展和深入研究,卫星雷达测高技术已日趋成熟,应用范围不断扩大,社会效益也越来

越显著。近期该领域国际上也表现出一些新的发展动向和关注点,因此加强该专题的国际科研动态跟踪调研非常必要,对于今后我国在该领域的理论和应用研究具有重要的指导和借鉴意义。

2 卫星雷达高度计发展概况

自 1973 年第一颗星载主动微波遥感器 Skylab 发射以来,雷达测高技术得到了迅速的发展,至今世界上已相继实施了 10 余项卫星测高计划,各主要测高卫星的基本情况归纳为表 1^[1~3]。

表 1 卫星测高任务的发展历程
Table 1 The development of satellite altimetry

| 卫星名称 | 国别 | 发射日期 | 轨道高度/km | 轨道倾角/° | 工作寿命/a | 重复周期/d | 测高精度/cm | footprint/km |
|----------------|-----|-------------|---------|--------|--------|----------|-----------|--------------|
| Skylab | 美国 | 1973. 5. 14 | 425 | 50 | 0. 25 | / | 85~100 | 8 |
| Geos-3 | 美国 | 1975. 4. 9 | 840 | 115 | 3. 5 | 2. 3 | 25~50 | 3. 6 |
| SeaSat | 美国 | 1978. 6. 28 | 800 | 108 | 0. 3 | 3. 17 | 20~30 | 1. 7 |
| GeoSat | 美国 | 1985. 3. 12 | 800 | 108 | 4 | 17 | 10~20 | 1. 7 |
| ESR-1 | 欧洲 | 1991. 7. 17 | 785 | 98. 5 | 3 | 335. 168 | 10 | 1. 7 |
| TOPEX/Poseidon | 美/法 | 1992. 8. 10 | 1 336 | 66 | 4 | 10 | 6 | 2. 2 |
| ERS-2 | 欧洲 | 1995. 4. 21 | 800 | 98. 5 | 9 | 35 | 10 | 1. 7 |
| GFO | 美国 | 1998. 2. 10 | 800 | 108 | 9 | 17 | 2. 5~3. 5 | 2 |

收稿日期:2012-08-09;修订日期:2012-11-29
基金项目:中国科学院对地观测与数字地球科学中心主任创新基金项目(Y2ZZ17101B),中欧“龙计划”(ID. 10466),国家 973 计划项目(2009CB723901)资助。
作者简介:高 乐(1985—),男,山东新泰人,博士研究生,主要从事雷达对地观测数据处理与应用方面的研究。E-mail:sdgaole@163. com。

续表 1

| 卫星名称 | 国别 | 发射日期 | 轨道高度/km | 轨道倾角/° | 工作寿命/a | 重复周期/d | 测高精度/cm | footprint/km |
|-----------|-----|-------------|---------|--------|----------|-------------------|-----------|--------------|
| Jason-1 | 法/美 | 2001. 12. 7 | 1 336 | 66 | 2 | 10 | 4. 2 | 2. 2 |
| ENVISat | 欧洲 | 2002. 3. 1 | 800 | 98. 5 | 5~10(在轨) | 35 | 2. 5 | 1. 7 |
| ICESat | 美国 | 2003. 1. 12 | 590 | 94 | 5~7 | 183 | 10 | 0. 07 |
| CryoSat-1 | 欧洲 | 2005. 10. 9 | 717 | 92 | 发射失败 | 369(30 sub-cycle) | 1~3 | 1. 6 |
| Jason-2 | 法/美 | 2008. 6. 20 | 1 336 | 66 | 6(在轨) | 10 | 2. 5~3. 4 | 2. 2 |
| CryoSat-2 | 欧洲 | 2010. 4. 8 | 717 | 92 | 3. 5(在轨) | 369(30 sub-cycle) | 1~3 | 1. 6 |
| HY-2A | 中国 | 2011. 8. 16 | 971 | 99. 34 | 3(在轨) | 14 | 4 | 2 |

卫星测高技术处于不断的发展之中,其实用性得到了系统发展,技术水平和测量精度也在不断提高,目前在轨的测高卫星主要有 Jason-2、ENVISat、CryoSat-2、HY-2 等。近几年以及将来的几十年,世界各国还将继续先后发射载有雷达高度计的卫星平台,如图 1。

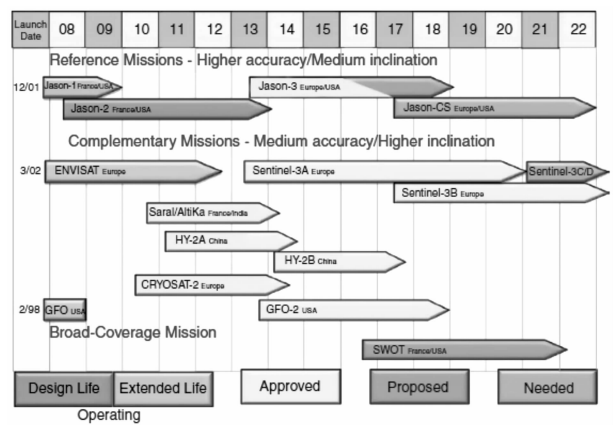


图 1 2008~2022 年雷达测高计划和状态^[3]
Fig. 1 Radar altimetry missions schedule and status from 2008 to 2022

根据卫星测高技术的原理,测高的精度主要取决于高度计精度、径向定轨精度和对测高值进行地球物理改正(如大气延迟、电离层改正等)的情况,其中最大程度上取决于定轨精度的提高。在卫星测高技术发展的早期,卫星精密定轨水平较低,轨道精度一般为几十厘米,难以探测到变化幅度不超过几厘米的海洋现象的变化。直至 20 世纪 90 年代,以 T/P 卫星的发射为标志,随着卫星精密定轨技术的发展,定轨精度达到了厘米量级,海洋卫星测高技术也进入了一个新的发展时期,使卫星测高技术在应用上达到定量阶段^[4]。

近几十年来随着观测手段的更新,数据采集由点到面,研究地域类型和范围更加广泛。但在实际应用中,不同周期的卫星数据间存在卫星轨道不严格重复、星下点在全球分布不均匀等问题,要想得到

高精度的监测结果,还需要对数据进行相应的处理。例如,针对轨道不严格重复这个问题通常采用“共线法平差”^[5]原理来消除误差,它提供了每个正常点不同周期海面高的观测值,进而可研究每一正常点处的观测时间内的海面变化;针对每一重复周期内监测点不均匀分布的问题,则采用“加权平均”的方法来解决,人们通常关心的不仅仅是某一点上的海面变化,更加关心某个区域甚至全球的海面变化,通过“加权平均”处理后的测高数据正好满足这方面的需要^[6]。因此,伴随着数据处理方法的不断完善,卫星测高数据的应用也逐步从一个个点的变化,逐步扩展到整个面上的变化监测和研究。

3 卫星雷达测高的应用

卫星测高作为一项重大的空间计划,其最初目的比较单一,就是试图从空中采用遥测的方法确定海面形状,研究大洋环流和其它海洋学参数。之后,由于测高数据精度的大幅提高,卫星测高在海洋学、大地测量学和地球物理学领域也得到了空前规模的应用。纵观国内外对卫星测高的应用研究,主要集中在海洋、陆地水体、冰川以及测绘等方面。

3.1 海洋应用——雷达高度计为海洋水体运动研究提供基础资料

卫星测高的海洋应用研究均基于 3 个基本观测量^[1-2]:海面高度、有效波高及海面风速,它们可为海洋水体运动研究提供基础的数据支持,有助于海上天气和海面状态的预报。

雷达测高最初和最广泛的应用是全球海平面变化^[6-7]。海平面变化是气候变化的重要特征,近年来学者利用测高数据分析了海平面变化与一些全球性气候现象的关系,比如厄尔尼诺^[8],了解了气候波动对海平面的影响,有助于天气预报模型对于短期天气的预报以及厄尔尼诺及拉尼娜等极端天气的出现。

海面由于存在波浪起伏不平,高度计发出的脉冲回波信号强弱不同而且有一定时域展宽,波高越

大,回波信号的展宽越大,因此可以通过建立海面 and 回波信号之间的关系,识别海洋表面特征^[9]。

在海风的作用下能够产生厘米尺度的波浪,从而引起海面粗糙度的变化,高度计的后向散射截面与海面风速存在一种反比关系,从而测出风速,其结果对于海洋工程(比如海岸码头)的建造或者对于大、中尺度的气候变化都很有用处^[10]。而结合地球自转模型,可以用于海洋环流的研究,洋流作为海洋环境的另一组成部分,既有全球性变化,也有局部性变化,还有瞬时变化,各种尺度变化交织在一起,利用卫星高度计测量的海面风场,可以研究海面的作用力,从而研究洋流及其变化。

3.2 陆地水体应用——解决无水位观测水域的水位监测

从 20 世纪 80 年代末起,有学者开始将雷达测高应用于内陆湖泊、河流的水位变化监测^[11],后来又扩展到湿地监测^[12],现已发展到了业务化阶段。卫星测高在内陆水域水位变化监测上表现出良好的应用前景,尤其是那些大型的内陆湖泊水域。

湖泊作为地表水的重要载体,对水资源短缺、水环境恶化、水灾害频发等反映敏感,提供了大量的气候、降水和湿度变化等信息,而区域性的湖泊水位同步变化可以过滤掉局部地域影响因素,反映出较大范围的气候变化。

大型湖泊、河流的水位通常由地面水文站的定点、连续观测提供,然而这种观测方式往往需要一定的人力、物力和财力资源保障。对地处偏远的湖泊、河流,要在其周边布置地面观测站点往往非常困难,尤其是在一些经济条件相对落后、自然环境相当恶劣的地区。近年来,随着新一代测高卫星任务不断进行,测高技术能为这些缺乏地面水文观测的陆地水域水位变化监测提供技术支持。

当湖泊、河流、湿地等陆地水域面积足够大,并且有测高卫星的地面轨迹通过时,就可以利用卫星测高技术监测其水位变化,对其水位变化实施动态监控。在这方面,国内外已经有了一些成功的研究,利用卫星高度计水位观测序列数据,结合局地气象数据,对湖区水域在气候变化条件下的演变趋势进行研究^[13]。

3.3 冰川应用——生态环境保护

在冰川方面,雷达测高主要用于海冰、陆地冰的测绘和监测,以研究冰川融化与全球变暖、全球物候因子(如温度、降水量)的定量关系。

自 1978 年对南北极冰盖的观测数据积累至今,

科学家已经得到了极地冰盖超过 30 a 的时间序列,研究由于全球变暖、降雪和冰川融化引起的冰盖高程的年季变化,估算冰盖的质量衡量^[14],并准确测量海洋冰面高度和冰的体积,测量海上冰盖的消长,监测海冰的分布和运动^[15]。

3.4 测绘应用——地球重力场、海底地形

全球及区域重力场模型^[16]是现代大地测量和相关地球物理科学发展的重要基础,实现高精度的地球重力场是地球科学的一个重要目标,对军事发展也有着重要的影响,卫星测高资料极大满足了重力场理论的需求。如果利用卫星测高所获取的观测数据作为边界条件建立海洋动力模型^[17],就可以计算出海洋的深度,从而绘制出海底的地形、地貌。海底地形、地貌图是现代潜艇和各种水面舰艇顺利执行各项军事使命不可或缺的测绘保障^[18]。

4 卫星雷达测高的发展趋势

4.1 从海洋扩展到内陆水域

近年来,卫星雷达测高技术逐渐从最初的海平面变化监测扩展到湖泊等内陆水域的水位变化监测中。

1982 年,Brooks^[19]将 Seasat 卫星观测的湖面高程数据用于绘图;1994 年,Birkett^[20]使用 Geosat 数据监测了几个湖泊的水位变化;Ponchaut 与 Cazenave^[21]使用 1993~1996 年的 T/P 数据研究了非洲 Tanganyika、Malawi、Turkana 和北美洲 Superior、Michigan、Huron 共 6 个湖泊的水位变化及与降水量的关系;Birkett 等^[22]研究了印度洋气候变化与东非湖泊影响关系;Mercier 等^[23]使用 1993~1999 年的 T/P 数据研究了受印度洋气候影响的非洲 12 个湖泊的水位变化;Camilo 等^[24]则利用 2004~2006 年的 Envisat 测高数据结合地面观测,对 Izabal 湖的水位变化进行了动态监测,并深入分析了其与当地的天气状况、区域气候变化的关系;Hyongki Lee 等^[25]利用 Envisat 测高数据分析了 2002~2009 年青藏高原东部地区的湖面高程变化。

4.2 多任务海量数据的处理

近 40 a 来,多种海洋、极地卫星测高计划任务得到不断实施,卫星测高数据以海量形式不断增加。而多种测高卫星任务的出现,也为地学、大地测量学和海洋学的研究提供了更加丰富的数据。对所有这些测高系统的综合运用和交叉,可以充分发挥各系统的优势^[5,26],因此研究多任务海量数据的联合应用及处理技术也成为十分迫切的任务。

4.3 从科研到实用

当前卫星测高观测平台不断丰富,数据精度不断提高,卫星测高技术在继续深入研究的同时,也渐渐进入到业务化生产实施阶段。例如,大的水库或者湖泊都位于全球面积较大的农业区之内,其水位变化研究可以作为作物估产的基础。美国农业部外国农业服务司、美国宇航局(NASA)以及马里兰大学进行合作,跟踪检测了全球多个湖泊和水库的水位变化,以便于迅速确定区域性干旱^[27]。欧洲也有类似的项目计划,英国的蒙特福特大学和欧空局合作开发了一个系统,利用 ERS 和 EnviSat 获得湖泊和河流的水位^[28]。

5 卫星雷达测高技术存在的难点

与各种卫星成像装置不同,一般雷达高度计只能提供其轨道飞行方向星下点足迹(footprint)某一范围内的高程观测信息平均值。另外,卫星测高数据精度受卫星轨道、测高范围、观测误差修正,以及目标大小、类型等多种因素的控制和影响。目前雷达测高技术在实际应用中,还存在如下技术难点:

(1)测高数据不能完全覆盖全球,不能同时达到较高的时间分辨率与空间覆盖。

卫星测高任务通常采用一颗在轨卫星和星下点观测的工作模式,即有限脉冲模式(pulse-limited)。由于只能进行沿轨观测,轨道之间的间隔区域没有观测数据,因此数据不能完全覆盖全球。

对于一颗卫星而言,其重复周期和相邻轨道间隔是一对矛盾。轨道的重复周期较短,则相邻轨道之间的间隔较大。反之,若相邻轨道之间的间隔较小,则轨道的重复周期较长。这就造成卫星观测数据的时间采样和空间采样不能同时获得较高的分辨率。

要有效提高测高数据的空间覆盖或时间分辨率,可尝试组建使用相同配置的测高卫星星座^[29]。利用星座技术,根据不同需求调整卫星之间的距离,得到高空间覆盖、高时间分辨率或均匀空间覆盖的观测数据,以及针对某一特定区域的数据覆盖。

要大幅增加卫星数据覆盖范围,还可发展宽幅卫星高度计^[29-30],即将脉冲雷达高度计与干涉高度计联合使用,干涉高度计可获得更高的测高精度。在卫星上除安装一个传统高度计外,还可在一个较长的基线两端分别安装干涉天线。应用干涉测量技术,每个天线均可发射微波,并同时接收来自另一干涉计的回波信号(如图 2),中间星下点的条带(Nadir swath)是脉冲雷达高度计的测量条带,条带宽

度只有几 km,而星下点两侧的条带(Swath-1,2)是由基线两端的雷达天线干涉得到,条带宽度可到达上百千米,这种基于雷达干涉的高度计称为宽幅海洋高度计(Wide Swath Ocean Altimeter,WSOA)。脉冲高度计系统提供精确的星下点观测值以及电离层延迟、对流层延迟和海况偏差等环境效应改正数,为干涉高度计的距离观测值提供参考。

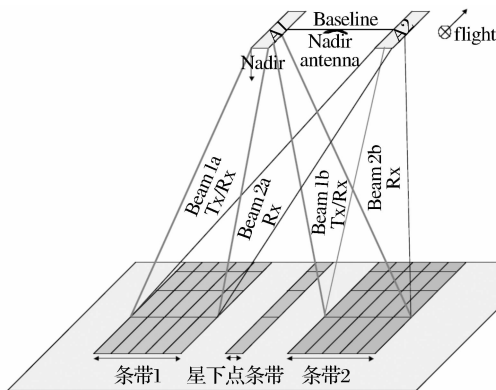


图 2 宽幅雷达高度计工作原理^[30]

Fig. 2 The working principle of wide swath altimeter

(2)卫星对于复杂地形区域的探测能力较差、精度较低。

有限脉冲卫星高度计的设计主要针对较为均一且相对平滑的地表类型,如海洋、大型冰帽等,而对于那些地面类型复杂或高低起伏较大的地形,往往会带来数据的丢失或信息失真。例如,在近岸几十公里的浅海区域以及内陆冰川、湖泊水域等,由于环境相对复杂以及雷达回波受到陆地反射信号干扰,测高数据精度相对较低,对河流等窄水体以及山区冰川高程观测的难度则更大。测高精度的提高主要依靠高度计传感器的改进,以及现有卫星测高任务的持续与未来测高任务的执行。在高度计本身精度难以很快得到大幅度提高的情况下,卫星测高精度的提高还将有赖于波形重构等数据处理算法的开发与改进。因此,可针对近岸和湖泊波形特征提出相应的新的波形重构方法^[31],以最大可能地消除波形噪声对数据精度的影响。

而对于干涉高度计,受复杂地形的影响较小,能获得很高的测量精度。近年来,提出了分布式卫星 InSAR 系统^[32]。分布式卫星 InSAR 系统是由若干颗小卫星按照特定的轨道构型编队运行,各小卫星之间通过协同工作来完成某种任务的一种新体制雷达系统,由于具有多功能、多工作模式、重访率高、生存和抗干扰能力强等优点,成为近年来的一个研究热点。传统的卫星受平台限制,难以形成足够长的

空间基线,只能以重复航迹的方式来获得干涉复图像,图像的相关性随时间的推移而大大降低。而在分布式星载 InSAR 系统中,多颗小卫星的图像可以进行多基线干涉,提高了测高精度。

6 结 语

几十年来,科学家对卫星雷达测高技术在海洋、陆地水体、冰川及军事上的应用进行了深入研究,它表现了新的发展方向和应用趋势,逐渐从纯理论研究发展到业务应用,受到人们越来越广泛的重视。

卫星雷达测高技术研究主要集中在美国和欧洲的一些发达国家,而其他国家,尤其是发展中国家该技术的发展则相对滞后。我国在 20 世纪 80 年代开始跟踪研究卫星测高技术,到今年才发射了自己的雷达测高卫星 HY-2A,相关科研的开展均要依赖于国外的卫星测高数据,受制于人,因此加强该专题的国际科研动态跟踪调研非常必要。

参考文献 (References):

- [1] Cai Yulin, Cheng Xiao, Sun Guoqing. A Review of Development of Radar Altimeter and Its Applications[J]. Remote Sensing Information, 2006, (4): 74-78. [蔡玉林, 程晓, 孙国清. 星载雷达高度计的发展及应用现状[J]. 遥感信息, 2006, (4): 74-78.]
- [2] Cai Yulin. Multi-source Remote Sensing Data Application Study on Poyang Lake Water Environment[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2006. [蔡玉林. 多源遥感数据应用于鄱阳湖水环境研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2006.]
- [3] Vignudelli S, Kostianoy A G, Cipollini P, *et al.* Coastal Altimetry[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. DOI: 10. 1007/978-3-642-12796-0.
- [4] Dong Xiaojun, Huang Cheng. Recent Progress in Satellite Altimetry[J]. Progress in Astronomy, 1997, 15(3): 179-186. [董晓军, 黄城. 海洋卫星测高技术的新进展[J]. 天文学进展, 1997, 15(3): 179-186.]
- [5] Li Jiancheng, Wang Zhengtao, Hu Jianguo. Mean Sea Level Variation Using Historic Satellite Altimeter Data[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 2000, 25(4): 343-347. [李建成, 王正涛, 胡建国. 联合多种卫星测高数据分析全球和中国海平面变化[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(4): 343-347.]
- [6] Yu Yifa. Advance of the Researches on the Variations of Mean-Sea-Level (MSL) in the Coastal Waters of China[J]. Journal of Ocean University of China, 2004, 34(5): 713-719. [于宜法. 中国近海海平面变化研究进展[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2004, 34(5): 713-719.]
- [7] Dong Xiaojun, Huang Cheng. Monitoring Global Mean Sea Level Variation with TOPEX/Poseidon Altimetry[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2000, 29(3): 266-272. [董晓军, 黄城. 利用 TOPEX/Poseidon 卫星测高资料监测全球海平面变化. 测绘学报, 2000, 29(3): 266-272.]
- [8] Chen D. Application of Altimeter Observation to El Nino Prediction[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(13): 2621-2626.
- [9] Tejera A, Garce-Weil L, Heywood K J, *et al.* Observations of Oceanic Mesoscale Features and Variability in the Canary Islands Area from ERS-1 Altimeter Data Satellite Infrared Imagery and Hydrographic Measurements[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(22): 4897-4916.
- [10] Chen G, Bi S W, Ezraty R. Global Structure of Extreme Wind and Wave Climate Derived from TOPEX Altimeter Data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(5): 1005-1018.
- [11] Ponchaut F, Cazenave A. Continental Lake Level Variations from TOPEX/Poseidon (1993~1996)[J]. Earth and Planetary Sciences, 1998, 326: 13-20.
- [12] Sarch M T, Birkett G M. Fishing and Farming at Lake Chad: Responses to Lake Level Fluctuations[J]. The Geographical Journal, 2000, 166(2): 156-172.
- [13] Zhang Guoqing, Xie Hongjie, Duan Shuiqiang, *et al.* Water Level Variation of Lake Qinghai from Satellite and In-situ Measurements under Climate Change[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2011, 5(1), 053532. DOI: 10. 1117/1. 3601363.
- [14] Shi Hongling, Lu Yang, Du Zongliang, *et al.* Mass Change Detection in Antarctic Ice Sheet Using ICESat Block Analysis Techniques from 2003 ~ 2008[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(4): 958-965, DOI: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 04. 010. [史红岭, 陆洋, 杜宗亮, 等. 基于 ICESat 块域分析法探测 2003~2008 年南极冰盖质量变化[J]. 地球物理学报, 2011, 54(4): 958-965, DOI: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 04. 010.]
- [15] Yang Y D, Dong C E, Wang H H, *et al.* Sea Ice Concentration Over the Antarctic Ocean from Satellite Pulse Altimetry[J]. Science China, Earth Sciences, 2011, 54(1): 113-118.
- [16] Yang Yuande. The Determination of Marine Gravity Anomalies over Antarctic Oceans from Satellite Altimetry[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010. [杨元德. 应用卫星测高技术确定南极海域重力场研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.]
- [17] Tian Jiasheng, Liu Qiaoyun, Zhou Cheng, *et al.* The Research of a New Wind Speed Retrieving Function based on the Fully Sea States[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(1): 243-247. [田加胜, 刘巧云, 周程, 等. 一种充分考虑高海况的风速反演算法研究[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(1): 243-247.]
- [18] Liu Fuqian, Luo Yongjun, Wang Chao. Present Status on the Research of the Satellite Altimeter's Application[J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 29(9): 28-31. [刘付前, 骆永军, 王超. 卫星高度计应用研究现状分析[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(9): 28-31.]

- [19] Brooks R L. Lake Elevation from Satellite Radar Altimetry from a Validation Area in Canada[M]. Report, Geoscience Research, Corporation, Salisbury, 1982, MD, USA.
- [20] Birkett C M. Radar Altimetry: A New Concept in Monitoring Lake Level Changes[J]. EOS Transactions, AGU, 1994, 75 (24): 273-275.
- [21] Ponchaut F, Cazenave A. Continental Lake Level Variations from Topex/Poseidon (1993-1996)[J]. Comptes Rendus De L Academie des Sciences Series IIA Earth and Planetary Science, 1998, 326: 13-20.
- [22] Birkett C. Synergistic remote sensing of Lake Chad: Variability of Basin Inundation[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 72: 218-236.
- [23] Mercier F, Cazenave A, Maheu C. Interannual Lake Level Fluctuations (1993-1999) in Africa from Topex/Poseidon: Connections with Ocean-atmosphere Interactions over the Indian Ocean[J]. Global and Planetary Change, 2002, 32: 141-163.
- [24] Camilo E M, Jesus G-E, Jose J, *et al.* Water Level Fluctuations Derived from ENVISAT Radar Altimeter (RA-2) and in-situ Measurements in a Subtropical Waterbody: Lake Lzabal (Guatemala)[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112: 3604-3617.
- [25] Lee H, Shum C K, Kuo-Hsin T, *et al.* Present-Day Lake Level Variation from Envisat Alimetry over the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau: Links with Precipitation and Temperature [J]. Terrestrial Atmospheric Oceanic, 2011, 22 (2): 169-175. doi: 10.3319/TAO.2010.08.09.01.
- [26] Li Jiancheng, Ning Jinsheng, Chen Junyong, *et al.* Determination of Gravity Anomalies over the South China Sea by Combination of TOPEX/Poseidon, ERS2 and Geosat Altimeter Data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30 (3): 197-202. [李建成, 宁津生, 陈俊勇, 等. 联合 TOPEX / Poseidon, ERS-2 和 Geosat 卫星测高资料确定中国近海重力异常[J]. 测绘学报, 2001, 30(3): 197-202.]
- [27] United States Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service[DB/OL]. <http://www.pecad.fas.usda.gov/>, 2012.
- [28] European Space Agency. River & Lake Monitoring[DB/OL]. <http://tethys.eaprs.cse.dmu.ac.uk/RiverLake/shared/main>, 2012-9.
- [29] Wang Haihong, Zhong Bo, Wang Wei, *et al.* Limitations of Satellite Altimetry and Future Technology Improvements[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(1): 91-95. [汪海洪, 钟波, 王伟, 等. 卫星测高的局限与新技术发展[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(1): 91-95.]
- [30] Cotton P D, Yves M. Future Requirements for Satellite Altimetry: Recommendations from the Gamble Project for Future Missions and Research Programmes[EB/OL]. http://earth.esa.int/workshops/venice06/participants/946/paper_946_cotton.pdf.
- [31] Yang Le, Lin Mingsen, Zhang Youguang, *et al.* Improving the Quality of JASON-1 Altimetry Data by Waveform Retracking in Coastal Waters of China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(6): 91-100. [杨乐, 林明森, 张有广, 等. 中国近岸海域高度计 JASON-1 测量数据的波形重构算法研究[J]. 海洋学报, 2010, 32(6): 91-100.]
- [32] Wang Tong, Bao Zheng, Liao Guisheng. Interferometric Measurement of Terrain Elevation with Distributed Micro-satellites[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(7): 859-862. [王彤, 保铮, 廖桂生. 分布式小卫星干涉高程测量[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(7): 859-862.]

Applying Status and Development Tendency of Satellite Radar Altimeter

Gao Le^{1,2}, Liao Jingjuan¹, Liu Huanling³, Guo Wei⁴

(1. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Science, Beijing 100094, China;

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

3. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

4. School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Since the new century, altimetry technology of satellite radar is rapidly developing and shows the new development trends, parts of fields which have entered the business implementation stage. This paper introduces in detail radar altimeter's application in surveying and mapping of the sea, terrestrial water and glaciers, and analyzes some problems existing in the technology. In the field of radar altimetry, there is still a big gap between China and western developed countries, so it's very necessary and timely to strengthen the field research.

Key words: Radar altimetry; Sea; Terrestrial bodies of water; Glaciers; Surveying and mapping