文章编号:1671-8860(2008)12-1288-04　　文献标志码:A

Geosat/GM 波形重跟踪反演中国沿海区域重力异常

杨元德[1,2]　鄂栋臣[1,2]　黄金维[3]　汪海洪[4]

(1　武汉大学测绘学院中国南极测绘研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2　极地测绘科学国家测绘局重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(3　台湾交通大学土木工程学系,新竹市大学路 1001 号,30050)
(4　武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘　要:利用 Geosat/GM 测高波形数据,在中国海域内(117 °E～129°E, 21°N～41°N)比较了阈值法、Beta5 和改进阈值法三种重跟踪算法。分析表明,改进阈值法优于其他两种重跟踪方法。由改进阈值法的测高数据,分别采用最小二乘法(least square collocation, LSC)和逆 Vening-Meinesz(IVM)计算了卫星测高重力异常,并与船测重力数据进行了比较。结果显示,LSC 的精度优于 IVM。与 KMS02 和 Sandwell&Smith V15 两个重力场模型相比较,本文结果在东海优于这两个模型,在台湾海域结果稍差,需要融合 ERS-1 等其他数据进一步提高精度。

关键词:Geosat/GM;波形重跟踪;重力异常;最小二乘配置;逆 Vening-Meinesz
中图法分类号:P223.7; P229.2

卫星测高反演海洋地区重力异常的起算数据主要有海平面高(sea surface height, SSH)和海平面梯度(sea surface gradient, SSG)[1]两种,这两种数据均以 SSH 为基础。沿海区域由于受陆地和海潮模型等各种误差[1]的影响,使得卫星测高波形数据受到影响,因而 SSH 通常误差较大,使得部分沿海区域往往为数据空白区。波形重跟踪已经被证实为一种能改善沿海区域 SSH 精度的方法和技术[2,3]。本文利用 Geosat/GM 波形数据,在中国沿海区域(117 °E～129°E, 21°N～41°N)对阈值法、Beta5[4]和改进阈值法[3]等三种波形重跟踪算法进行了比较。

1　Geosat/GM 数据分析

本文采用 10 Hz 的 Geosat/GM 波形数据,包括 GDRs、SDRs 和 WDRs,GDR 主要为 1 Hz 的地理改正量,该地理改正量通常包括固体潮、海潮、对流层、电离层、海况改正量、逆气压和 H_OFF 改正[2];WDR 包含 10 Hz 的 63 个波形数据,采用前 60 个波形用于重跟踪计算。值得注意的是,GDR 与 WDR 的时间系统需要统一[3]。

2　波形重跟踪算法的选取

选取三条 Geosat/GM 轨迹为波形重跟踪的比较对象,从数据利用率和海面地形(sea surface topography, SST)标准差两个方面进行比较,得到不同重跟踪算法改正后的 SST,结果统计见表 1。可以看出,虽然改进阈值法的数据利用率稍低于阈值法,但改进阈值法的标准差最小,Beta5 介于两者之间。因此,将改进阈值法选为波形重跟踪法。

比较重跟踪前后不同海水深度的 SST 标准差,结果见表 2。可以看出,海水深度大于 50 m 时,改进阈值法只能提高 0.01 m;但 50 m 以内,改进阈值法提高了 0.06 m,显著提高了其精度。

收稿日期:2008-10-16。
项目来源:国家测绘局南极考察地区基础测绘资助项目(1469990711109-1);国家自然科学基金资助项目(40704003);极地测绘科学国家测绘局重点实验室开放研究基金资助项目。

表 1　数据利用率与海面地形标准差的比较

Tab. 1　Comparison of Success Rate of Retracking and the Standard Deviation Between Retracked SSH and Modeled Geoid Heights

轨迹	地形重跟踪方法	总点数/个	有效点数/个	有效率/%	标准差/m
85097	Beta5	113	96	84.96	1.471
	阈值法	113	113	100	1.408
	改进阈值法	113	113	100	0.919
85122	Beta5	513	495	96.49	0.633
	阈值法	513	513	100	0.542
	改进阈值法	513	513	100	0.296
85249	Beta5	330	317	96.06	0.476
	阈值法	330	330	100	1.195
	改进阈值法	330	328	99.39	0.314

表 2　改进阈值法前后不同深度的海面地形标准差

Tab. 2　Standard Deviation of SST Before and After Improved Retracking of Different Depths

深度/m	总点数/个	原始 SST 标准差/m	改进阈值法 SST 标准差/m
0～50	44 120	0.445	0.383
50～100	47 431	0.302	0.291
100～150	14 141	0.285	0.268
150～200	3 931	0.374	0.363
＞200	67 247	0.430	0.419

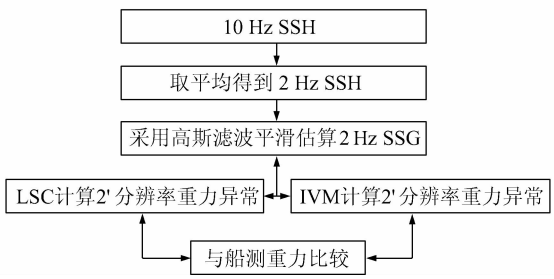

图 1　计算流程图

Fig. 1　Flowchart of Computation

3　数据处理

3.1　卫星测高重力异常的计算

根据以上结果,选取改进阈值法为本文的波形重跟踪算法。下面介绍 SSH 计算重力异常的流程。采用移去-恢复法,参考重力场模型为 360 阶 EIGEN-GL04C。首先由 SSH 得到剩余 SSG,然后采用 LSC 和 IVM 方法估算剩余重力异常,进而获得卫星测高重力异常,最后与船的实测重力异常进行比较。计算流程如图 1 所示。

取 10 Hz SSH 的标准差为 5 cm,为去掉 SSG 的粗差,限差取为 10 μrad;但对于台湾东部的海域,取为 20 μrad。以 2 Hz 的 SSG 为起算数据,分别用 LSC 和 IVM 估算了 2′分辨率的重力异常。

3.2　高斯滤波与粗差去除

由于 SSH 不准确,需要对其平滑及去除粗差,高斯滤波被证实为一种有效的算法。其公式为:

$$g(x)=\begin{cases}\mathrm{e}^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, & |x|\leqslant\dfrac{1}{2}D\\ 0,\text{其他}\end{cases}\tag{1}$$

式中,D 为窗口大小;$\sigma=D/6$。去除粗差采用如下方法:首先对各个点进行高斯滤波,得到每个点滤波前后的变化量,进而得到其标准差,如此循环,直到变化量的最大值小于 3 倍标准差。

4　结果分析

4.1　LSC 与 IVM 的结果比较

不采用高斯滤波,分别在流程中输入重跟踪前后的 10 Hz SSH,使用 LSC 计算重力异常,与船测重力进行比较,结果见表 3。表 3 结果表明,重跟踪能提高重力异常的精度。

表 3　LSC 方法,船测重力与卫星测高重力异常比较/mGal

Tab. 3　Statistics of Differences Between Shipborne and Altimeter-Derived Gravity Anomalies from LSC/mGal

区域		平均	均方差	最小	最大
台湾海域	原始	0.501	13.125	−102.455	91.566
	波形重跟踪	0.277	12.275	−108.208	83.586
东海	原始	1.244	5.811	−21.572	23.350
	波形重跟踪	1.270	4.842	−21.495	21.192

比较不同滤波波长下LSC算法的卫星测高重力异常与船测重力，统计结果见表4。由表4可以看出，滤波波长为16 km时，东海和台湾海域重力的均方差均最小。

表4 LSC方法，不同滤波波长下的船测重力与卫星测高重力异常的比较

Tab. 4 RMS Between Shipborne and Altimeter-Derived Gravity Anomalies of Different Wavelengths in LSC

区域	滤波波长/km	均方差/mGal
东海	无	4.842
	8	4.478
	16	3.880
	24	3.898
台湾海域	无	12.275
	8	11.869
	16	10.953
	24	11.227

采用IVM方法，对于不同的窗口大小，分别将卫星测高重力异常与船测重力进行比较，结果见表5。可见，提高窗口的大小能改进卫星测高重力异常的精度，但作用有限。由表4与表5可以看出，LSC得到的卫星测高重力异常精度优于IVM。

表5 IVM方法，不同窗口大小的卫星测高重力异常与船测重力的比较

Tab. 5 RMS Between Shipborne and Altimeter-Derived Gravity Anomalies of Different Window Sizes in IVM

区域	窗口大小/分	均方差/mGal
东海	15	5.177
	20	5.144
	25	5.126
台湾海域	15	19.266
	20	18.795
	25	18.399

4.2 改进阈值法与KMS和Sandwell&Smith的结果比较

KMS及Sandwell&Smith利用重跟踪后的Geosat和ERS-1数据分别计算出全球海洋重力场KMS02及V15，从中截取中国沿海区域的重力异常。表6给出了改进阈值法、KMS02及V15的重力异常与船测重力的比较结果。可以看到，在东海，改进阈值法得到的结果优于后两者，但台湾海域的精度不如后两者。虽然台湾海域的结果较差，但仍然优于文献[3]的结果。

表6 改进阈值法、KMS和Sandwell&Smith重力异常与船测重力的比较/mGal

Tab. 6 Statistics of Differences Between Shipborne and Altimeter-derived Gravity/mGal Anomalies of Improved Threshold, KMS and Sandwell&Smith Methods

区域		最大	最小	平滑	均方差
东海	改进阈值法	19.53	−22.04	1.29	3.88
	KMS02	19.96	−21.51	1.55	3.94
	Sandwell&Smith	18.15	−22.29	1.37	3.92
台湾海域	改进阈值法	93.26	−107.86	0.40	10.95
	KMS02	96.01	−113.13	−0.16	10.19
	Sandwell&Smith	95.78	−118.58	−1.5	8.88

由于KMS02及V15为重跟踪后的Geosat和ERS-1等多种数据综合计算的结果，因此，本文只采用Geosat/GM融合ERS-1等其他卫星测高波形数据来提高台湾海域卫星测高重力异常的精度。

5 结 语

综合数据利用率和海面地形SST标准差两个方面的比较说明，改进阈值法优于阈值法及Beta5两种重跟踪算法，LSC算法得到的精度高于IVM。在中国沿海区域，LSC算法16 km高斯滤波波长得到的结果最优，将结果分别与重跟踪后的KMS02和V15比较，东海的结果优于后两者，但台湾海域的结果稍差。

在一些地形变化很快的复杂沿海区域，如台湾海域，为了提高卫星测高重力异常的精度，需要进一步融合ERS-1等其他数据，采用更好的潮汐模型及波形重跟踪方法等。

参 考 文 献

[1] Hwang C. Analysis of Some Systematic Errors Affecting Altimeter-derived Sea Surface Gradient with Application to Geoid Determination Over Taiwan [J]. Journal of Geodesy, 1997,71:113--130

[2] Sandwell1 D T, Smith W H F. Retracking ERS-1 Altimeter Waveforms for Optimal Gravity Field Recovery [J]. Geophysical Journal International, 2005, 163:79-89

[3] Hwang C, Guo J Y, Deng X, et al. Coastal Gravity Anomalies from Retracked Geosat/GM Altimetry: Improvement, Limitation and the Role of Airborne

Gravity Data[J]. Journal of Geodesy, 2006,80:204-216

[4] 鄂栋臣,杨元德. 卫星测高波形重跟踪算法在南极应用的比较[J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(1): 45-49

[5] Anzenhofer M, Shum C K, Rentsh M. Coastal Altimetry and Applications[R]. Department of Geodesy Science and Surveying, Ohio State University, 1999

[6] Davis C H. A Robust Threshold Retracking Algorithm for Extracting Ice-Sheet Surface Elevations from Satellite Radar Altimeters[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 1994, 35(4): 974-979

[7] 王正涛,李建成,晁定波,等. 利用卫星测高数据研究海面高月异常变化与厄尔尼诺现象的相关性[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2004, 29(8):699-703

[8] 李建成,姜卫平,章磊. 联合多种测高数据建立高分辨中国海平均海面高模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2001, 26(1):40-45

第一作者简介:杨元德,博士生。主要从事卫星测高和南极重力测量研究。

E-mail:Yuande_yang@yahoo.com.cn

Chinese Coastal Gravity Anomalies from Waveform Retracked Geosat /GM Altimetry

YANG Yuande[1,2]　*E Dongchen*[1,2]　*HWANG Cheinway*[3]　*WANG Haihong*[4]

(1 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Key Laboratory of Polar Surveying and Mapping, SBSM, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 Department of Civil Engineering, Chiaotung University, 1001 Tahsueh Road, Hsingchu 30050, China)

(4 School of Geodesy and Geomatic, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: Three retracking methods are compared in the area 117°E-129°E, 21°N-41°N of China Sea, and the improved threshold shows the best result, using Geosat/GM waveform data. Least square collocation(LSC) gives a better result than IVM when comparing with the shipborne gravity and gravity anomaly from the improved threshold altimeter data. In order to improve the accuracy of altimeter gravity anomaly, the Guass filter is used and the wavelength is 16 km. The gravity anomalies from the improved threshold are compared with that of KMS02 and V15, the former is best in the East sea and a little worse than the other two in Taiwan area.

Key words: Geosat/GM; waveform retracking; gravity anomaly; LSC; IVM

About the first author: YANG Yuande, Ph.D candidate, majors in satellite altimetry and gravity in Antarctic.

E-mail: Yuande_yang@yahoo.com.cn

测绘遥感技术给敦煌文物穿上“数字外衣”

武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室、中国科学院计算机研究所和浙江大学正在联手攻关“数字敦煌”工程,已完成部分石窟的三维模型制作。“数字敦煌”工程包括虚拟现实、增强现实和交互现实三个部分。以武汉大学李德仁院士为首的课题组负责虚拟现实的设计策划、组织管理和具体实施,运用测绘遥感新技术,致力于将莫高窟的外形、洞内雕塑等全部文化遗迹,以 mm 级精度虚拟在电脑里。具体工作分为三步:首先是利用激光扫描技术将石窟里的所有壁画、佛像结构的位置数据测定,然后将数据进行整理组合,组建成模型,最后在电脑上对壁画和佛像进行着色,形成最终的三维模型。据悉,敦煌莫高窟共有 700 多个石窟,从 2006 年 8 月开始,两年多来,武汉大学的十几名科研人员已基本完成三个石窟的三维建模工作,全部工作需要 10～20 a 完成。