

利用卫星资料研究中国南海海底地形

罗 佳¹ 李建成¹ 姜卫平¹

(1 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要: 基于海洋重力异常与海深之间的密切关系, 推导了利用 FFT 技术由重力异常计算海深的模型; 利用该模型联合卫星测高数据和海洋重力资料反演了中国南海 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 海底地形; 探讨了各种地球物理信息对于反演海底地形的影响。

关键词: 海深; 卫星测高; 重力异常; FFT

中图法分类号: P229.1; P228.3

研究开发海洋的意义不仅是国防安全 and 经济建设的需要, 同时也是国家可持续发展战略得以实施的重要环节。海洋的合理开发利用必须建立在丰富的基础海洋信息成果之上, 高质量的海底地形图是其中最重要的部分之一。

国际上, 欧美、日本等已先后开展并完成了一系列海洋基础测绘工作, 而我国海洋基础研究正处于起步阶段, 基本数据库也正在建立之中。

由于传统海洋测深方法代价昂贵, 周期长, 很难满足现有科学研究和海洋开发的需要。海洋工作者对于如何高效地观测海洋从未停止过探索。其中, 基于地球外部重力场与地球内部质量分布有关的思想及由重力值推算海深的实验研究自 20 世纪 70 年代起陆续开展起来 (Arabelos, 1998)。首先, Dorman 和 Lweis 将 Bouguer 异常与海深的关系简化为线性关系 (Dorman, Lewis, 1970), 后续的研究也是基于这一假设 (黄大山, 黄金维, 1996)。Wang 于 1999 年提出重力异常与海深的平方近似成线性关系的理论。

另外, 低轨卫星测地技术是目前唯一能够将地球作为一个整体进行全局性观测的技术。特别是 20 世纪 70 年代发展起来的卫星测高技术, 对于恢复海洋重力场及研究海底地形作出了重大的贡献。而且 2000 年发射的 CHAMP 卫星以及后续的 GRACE 和 GOCE 计划将为研究海洋 (包括海洋重力场、洋流、大气) 提供前所未有的丰富资料。我国的海洋低轨卫星探测计划也正在酝酿之

中。这些为利用卫星测高以及其他重力资料进行海底地形的研究提供了条件。

1 基本数学模型和计算方法

海洋重力异常是由海洋的质量亏损、地壳的密度异常、水深的结构以及地壳以下质量的均衡补偿等因素引起的。其中, 海洋的质量亏损的影响居主导地位。这主要是因为海洋质量亏损对重力场的中波、短波部分影响的权重大, 其余因素对重力异常的贡献由于向上延拓而被平滑了。

如图 1, 根据位理论, 由异常质量引起的位为 (海斯卡涅, 莫里斯, 1967):

$$\delta V = G \iiint_V \frac{1}{l} dm$$

其中, G 是万有引力常数; l 是定点到动点的距离; dm 为质元; V 是海水体积。在平面近似下, 得:

$$\delta V = G\Delta\rho \iint_E \int_{-H}^0 \frac{dz}{l} dx dy$$

$$l = \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + (z - h)^2}$$

其中, $H \geq 0$ 是海深值; E 是二维平面; x 、 y 和 z 是局部坐标系, 坐标轴依次指向北、东和天顶方向; $\Delta\rho = \rho_0 - \rho_w$, 其中 ρ_0 是地壳密度, ρ_w 是海水密度。由海水质量亏损引起的重力变化为:

$$\delta g = -\frac{\partial \delta V}{\partial z} = G\Delta\rho \iint_E \left[\frac{1}{l_0} - \frac{1}{[l_0^2 + H^2]^{1/2}} \right] dx dy$$

$$l_0 = \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}$$

对上式进行级数展开得:

$$\begin{aligned} \zeta &= G\Delta^0 \iint_E \left[\frac{1}{2} \frac{H^2}{(l_0^2 + H^2)^{3/2}} + \right. \\ &\quad \left. \frac{3}{8} \frac{H^4}{(l_0^2 + H^2)^{5/2}} + \dots \right] dx dy \end{aligned}$$

由上式可以看出, 水深与重力异常的关系并不是简单的线性关系。对上式进行一阶近似, 并且取上式分母中的 H 为一特定海域的平均海深 H , 可得出:

$$\zeta \approx \frac{1}{2} G\Delta^0 \iint_E \frac{H^2}{(l_0^2 + H^2)^{3/2}} dx dy$$

等式的 Fourier 变换为(罗纳德, 1986):

$$f_\zeta = \frac{1}{2\omega} G\Delta^0 f_{H^2} \exp(-2\pi\omega H)$$

此处, f_ζ 和 f_{H^2} 分别是 ζ 和海深平方的 Fourier 变换; ω 为波数的尺度。上式表明, ζ 与海深的平方具有非常近似的线性关系。

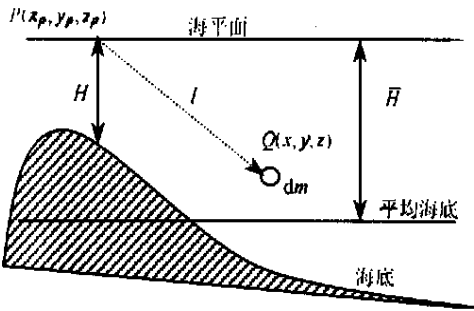


图 1 质量亏损与重力异常关系

Fig. 1 Relationship between Mass Deficiency and Gravity Anomaly

海深与重力异常关系的函数表达式主要反映了中、短波长的水深与重力异常关系(黄大山, 黄金维, 1996)。由于由重力异常推算海深是一个向下延拓过程, 若直接用水深与重力异常关系的函数表达式计算可能会使计算结果产生振荡, 背离实际值, 导致计算失败。另外, 由于地质数据的缺乏, 海底地壳以及其下地幔物理性质几乎很难精确描述, 这也是引起计算失败的原因。因而实际计算中, 采用滤波方法先滤掉海深的长波部分, 计算海深的中、短波部分, 然后由海深的长波和中、短波部分恢复实际海深。

本文利用由卫星测高资料计算得到的空间重力异常格网值, 基于 EGM96 重力场模型和 TBASE 海深模型确定了海深。计算步骤如下:

- 1) 计算残余重力 $\Delta g^{res} = \Delta g - \Delta g^{ref}$;
- 2) 由 Δg^{res} 利用水深与重力异常关系的函数表达式计算残余海深;

- 3) 由残余海深和参考海深恢复实际海深 H , $H = H^{res} + H^{ref}$;

- 4) 将反演海深值与实测海深值比较, 确定系统偏差, 并对反演海深值进行改正;

- 5) 再次进行反演计算。

其中, Δg^{ref} 为参考重力异常(本文采用 EGM96 $2.5' \times 2.5'$ 重力场模型); Δg 为由卫星测高资料推算得的重力异常值; Δg^{res} 为残差重力异常值; H^{ref} 为参考海深值(本文采用 TBASE $5' \times 5'$ 海深模型); H^{res} 为残差海深值; H 为推算的海深值(即图 1 中的 H)。

2 用于反演计算的数据

在研究海底地形的过程中, 以下几个方面的信息应予以考虑: ①地球重力场信息; ②海底沉积物信息; ③洋流信息; ④海底地质构造(包括地壳、地幔)信息; ⑤以前的海底地形资料。

地球重力场信息一方面来源于经过数据编辑和环境改正后的多代卫星测高资料(GEOSAT、ERS-1/2 和 T/P 数据)确定的南海海域的空间重力异常。其基本方法是: 首先联合多种卫星测高数据采用全组合方法求取交叉点及其垂线偏差, 然后利用逆 Venning-Menzies 公式求得高分辨率的南海区域空间重力异常格网数据(李建成等, 1996)。格网空间重力异常的分辨率达到 $2.5' \times 2.5'$, 精度优于 8mGal。另一方面, 由于本文的基本思想在于“移去—恢复”过程, 这就需要一个高精度的全球地球重力场模型(本文采用了 360 阶的 EGM96 地球重力场模型)。

不同海域的海底沉积物由于受到洋流、气候和海底地形的影响, 情况十分复杂。当前的问题在于没有一个适用的全球沉积物模型(甚至局部的沉积物模型), 当沉积物达到一定厚度时将对反演计算产生很大影响。本文对沉积物影响的处理, 实质上是将较厚而密度较小的沉积物“压薄”, 使其密度等同于海底地壳密度, 并通过系统偏差的调整和“移去—恢复”法进行有效的近似处理。

洋流和海底地质构造的综合影响集中反映在海洋重力异常信息之中, 所以利用重力场信息反演海深时, 如何消除这部分因素的影响需作深入研究。本文限于现有资料和技术的原因, 利用“移去—恢复”法回避了上述难点。

对于某些干扰因素(确切地说是反映海洋系统不同侧面的信息), 虽然目前处理起来十分困难, 但是从长远看, 低轨卫星探测技术的进步和基

础理论的新发展,再加上相关学科之间的交融,以下几方面应作进一步深入研究。

1) 随着 CHAMP 以及 GRACE 和 GOCE 卫星重力计划的实施,地球重力场模型(特别是中、长波部分)将得到大幅度的精化,有利于研究地球内部和海深构造,但需要相应地研究精化的反演模型。

2) 利用相对密集的重力场资料反演的海深和稀疏高精度实测海深的差值信息,必然包含有沉积物厚度和密度的信息,应研究利用这一信息确定海底沉积物的方法。

3) 对于洋流的研究,目前的水平可以达到 25 阶(汪海洪, 2001),随着 GRACE 计划的实施,可望在精度和分辨率方面有重大突破。这也有助于研究海洋沉积物分布。

4) 重力异常和海深的关系与洋壳的补偿模式密切相关,即重力异常对海深的响应函数,在艾黎补偿模式下,含补偿根深度参数;在弹性板块补偿模式下,含板块的弹性厚度参数。这些参数一般难以确定,需要有可靠的海洋地质和地球物理资料,这是一个需深入探讨的问题。目前都是采用无补偿模式结合“移去—恢复”法推求海深。

3 结果与分析

3.1 对 TBASE 海深模型的改善

图 2、图 3 分别为由 TBASE 和本文所建模型计算的南海海深图,图 4 为它们之间的残差图。从图 2 可以看出,在 $15^{\circ}\text{N}115^{\circ}\text{E}$ 附近有一明显类似海山的构造,而在 TBASE 模型中没有表现出来;在 $22.5^{\circ}\text{N}126^{\circ}\text{E}$ 附近反演的海底地形比 TBASE 模型要精细得多,在 $10^{\circ}\text{N}115^{\circ}\text{E}$ 附近反演的海底地形对海底精细结构的反映也较 TBASE 模型要细致等等。此外,从图 4 可以看出,模型值与计算值整体趋势一致,残差小于 $\pm 250\text{m}$ 。

3.2 与船测水深值的比较

作为外部检核,将分别由 TBASE 模型和本文所建模型计算的海深与 GEODAS 在该地区 49 096 个船测海深值进行了比较(点位分布如图 5),结果如表 1 所示。从表 1 中可以得出以下结论。

1) 模型值与船测值之间存在较大的系统误差,这可能是由于船测的深度基准面与 TABSE 模型所采用的高程基准的不一致造成的。剔除系统误差,反演精度较以前有明显提高。

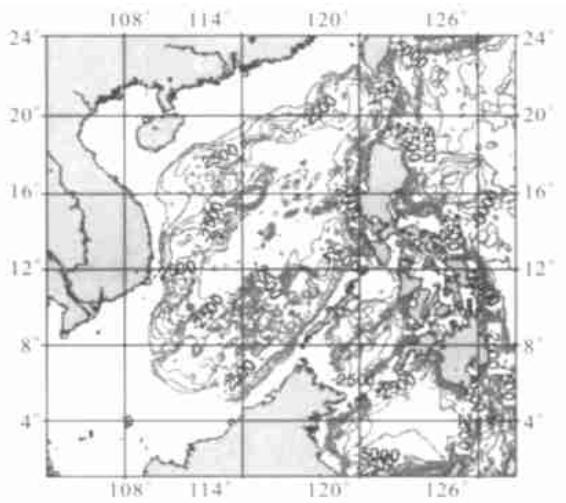


图 2 TBASE 海深模型
Fig. 2 TBASE Model Bathymetry

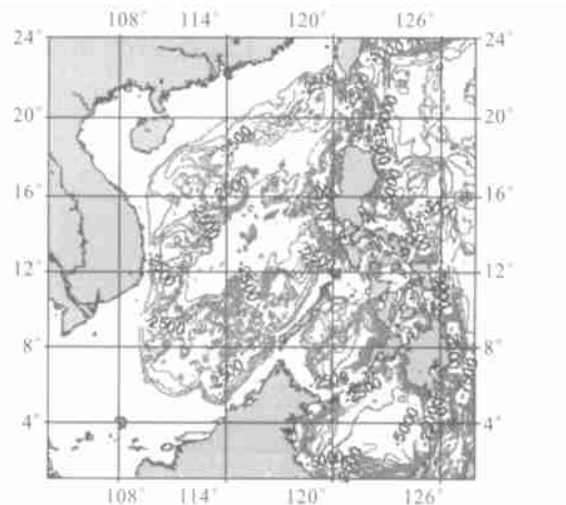


图 3 反演海深模型
Fig. 3 Inversion Model Bathymetry

2) 随着深度的增加,利用测高数据和地球物理数据反演的海底地形的相对精度也越高。

3) 按海深的深度分级进行系统误差剔除之后,计算精度有较大提高。这说明地质效应对空间重力异常的影响与海深有直接的关系。

4) 海深大于 4 000m 的海域,计算模型对 TBASE 海深模型有了较大的改善,即通过引入重力数据计算水深对模型的精度和分辨率都有一定程度的提高。

5) $1\,000\text{m}$ 到 $4\,000\text{m}$ 的浅水范围,反演精度不及模型精度,这表明南海在此海深范围的海底地质比较复杂,特别是浅水区域由于近岸、地形效应比较复杂,测高资料也较差,因此在这种区域反演海深时,需要对地质状况作更深入的分析。

由以上分析可知,利用卫星测高数据计算所得的重力数据对改进开阔海洋的海深是有效的。

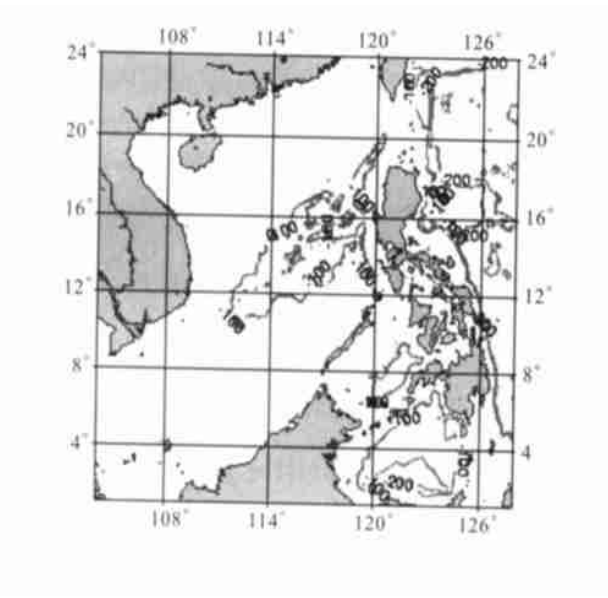


图 4 模型差值

Fig. 4 Deference between TBASE Model
and Inversion Bathymetry

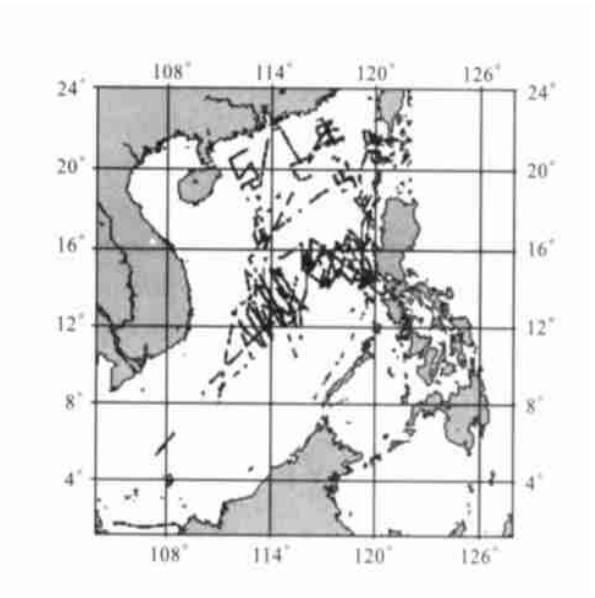


图 5 船测水深点分布图

Fig. 5 Distribution of Ship Bathymetry

表 1 TBASE 模型与反演结果比较/ m

Tab. 1 Comparison of TBASE Model and Inversion Results/ m

| 海深范围 | Geo DAS 测点个数 | 是否剔除 系统误差 | TBASE 模型值 | | 反演值 | |
|-------------|--------------|--------------|-----------|---------|---------|---------|
| | | | RMS | STD | RMS | STD |
| 1 000~2 000 | 1598 | 否 | 249. 68 | 249. 19 | 252. 99 | 250. 66 |
| | | 是 | — | — | * | * |
| 2 000~3 000 | 6469 | 否 | 245. 85 | 244. 16 | 258. 15 | 242. 77 |
| | | 是 | — | — | 251. 86 | 251. 86 |
| 3 000~4 000 | 9838 | 否 | 350. 87 | 349. 81 | 374. 32 | 350. 82 |
| | | 是 | — | — | 361. 76 | 361. 76 |
| 4 000~5 000 | 27681 | 否 | 231. 09 | 190. 56 | 207. 22 | 189. 67 |
| | | 是 | — | — | 187. 17 | 187. 17 |
| 大于 5 000 | 32 | 否 | 303. 32 | 212. 35 | 229. 75 | 213. 61 |
| | | 是 | — | — | 213. 62 | 213. 62 |

注: RMS 是均方根差,STD 是标准差,*表示无显著改进。

4 结 语

21 世纪是海洋的世纪, 无论是海洋开发还是军事领域, 高精度的海底地形都是必需的。综合考虑各种海洋信息因素, 联合其他地球物理数据, 顾及海洋地球补偿模式, 利用近期低轨卫星重力探测计划所提供的更高精度和更丰富的观测量作深入的分析研究, 同时进一步改进精化反演模型, 可望获得分辨率优于 10km, 精度优于 100m 的全球海深数值模型。

参 考 文 献

1 黄大山, 黄金维. 利用人造卫星测高仪资料推算海深.

测量工程, 1996 37(2): 33~51

2 李建成, 宁津生, 晁定波. 卫星测高在物理大地测量应用中的若干问题. 武汉测绘科技大学学报, 1996 21(1): 9~14

3 刘雁春. 海洋测深空间结构及其数据处理: [博士论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1998

4 罗纳德 N. 傅里叶变换及其应用. 杨燕昌译. 北京: 人民邮电出版社, 1986

5 罗 佳. 由测高数据和海洋重力资料联合反演海底地形: [硕士论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 2000

6 汪海洪. 利用卫星测高确定大洋环流模式及其变化: [硕士论文]. 武汉: 武汉大学, 2001

7 海斯卡涅 W A, 莫里斯 H. 物理大地测量学. 卢福康, 胡国理译. 北京: 测绘出版社, 1979

8 Arabelos D, Tziavos I N. Gravity-field Improvement in

the Mediterranean Sea by Estimating the Bottom Topography Using Collocation. *Journal of Geodesy*, 1998, 72 (3): 136 ~ 143

9 Dorman L M, Lewis B T R. Experimental Isostasy, 1. Theory of the Determination of the Earth's Isostatic Response to a Concentrated Load. *J. Geophys. Res.*, 1970, 75 (17): 3 357 ~ 3 365

10 Dorman L M, Lewis B T R. Experimental Isostasy, 2. An Isostatic Model for the U. S. A. Derived from Gravity and Topographic Data. *J. Geophys. Res.*, 1970, 75 (17): 3 367 ~ 3 386

11 Ramillien G, Cazenave A. Global Bathymetry Derived From Altimeter Data of the ERS-1 Geodetic Mission. *J. Geodynamics*, 1997, 23 (2): 129 ~ 149

12 Smith W H F, Sandwell D T. Bathymetric Prediction from Dense Satellite Altimetry and Sparse Shipboard Bathymetry. *J. Geophys. Res.*, 1999, 99 (B11): 21 803 ~ 21 824

作者简介: 罗佳, 博士生。现从事物理大地测量和空间大地测量研究。
E-mail: jluo@wtusm.edu.cn

Bathymetry Prediction of South China Sea from Satellite Data

LUO Jia¹ LI Jiancheng¹ JIANG Weiping¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract: This paper focuses on the study of bathymetry prediction from satellite altimeter data and the use of FFT technique. In this study, the free-air gravity anomalies over the South China Sea are determined by the satellite altimeter data of GEOSAT, ERS-1, ERS-2 and T/P. And the $2.5' \times 2.5'$ bathymetry model in the South China Sea is calculated from the gravity anomalies by the inversion model given in this paper. After the analyses of the inversion results, some conclusions can be drawn.

- 1) In deep-water area ($> 4\,000\text{m}$), the accuracy of the bathymetry calculated from gravity anomalies is better than that of the TBASE model by over 15 %.
- 2) The calculating results contain the significant system error.
- 3) In the bathymetry calculating, eliminating the system error is helpful.
- 4) In the shallow-water area, the accuracy of the results almost has not been improved relative to the TBASE model.

Key words: bathymetry; satellite altimetry; gravity anomaly; FFT

About the author: LUO Jia, Ph.D candidate. He majors in physical geodesy and space geodesy.
E mail: jluo@wtusm.edu.cn