

联合多种测高数据确定全球平均海面 WHU2000

姜卫平 李建成 王正涛

(武汉大学测绘学院, 武汉 430079. E-mail: wpjiang@wtusm.edu.cn)

摘要 制定了比较全面的测高数据编辑准则, 改善了地球物理改正模型的精度; 系统地统一了不同测高数据的基准; 研究并实现了多种测高数据区域联合交叉点平差方法, 从而提高了 Geosat, ERS-1 和 ERS-2 的径向轨道精度; 完善了由多种测高数据确定全球平均海面(MSS)的理论与方法; 并利用 7 年的 Topex/Poseidon (11cycle~249cycle)数据、全部的 ERS-1/168 数据、52 个周期的 ERS-2 (1cycle~52cycle)数据、44 个周期的 Geosat/ERM (1cycle~44cycle)数据确定了全球平均海面 WHU2000, 其格网分辨率为 $2' \times 2'$, 范围为纬度 $\pm 82^\circ$ 之间, 整体精度优于 0.05 m. 将 WHU2000 MSS 与格网分辨率为 $3.75' \times 3.75'$ 的 CLS_SHOM98.2 MSS, $3' \times 3'$ 的 GFZ MSS95A 和 $3.75' \times 3.75'$ 的 OSU MSS95 等全球平均海面进行了比较, 所得差值的标准差(STD)分别是 0.090, 0.237 和 0.079 m.

关键词 卫星测高 平均海面 交叉点平差 海面高

平均海面(MSS)是当今地球科学和环境科学所关注的科学问题. 相对于参考椭球, 它包括了大地水准面和海面地形两部分信息, 因而被广泛地用于研究大地水准面、瞬时海面高、地壳形变、大洋环流、海平面变化等问题. 卫星测高作为 20 世纪 70 年代发展起来的一项空间测量技术, 它以卫星为载体, 借助于空间、电子和微波等高新技术来量测全球海面高(SSH). 由于卫星测高能在全球范围内全天候地多次重复、准确地提供海洋表面高度的观测值, 现已使其由最初的单一目的——从空中采用遥测的方法确定海面形状, 发展到在地球物理学领域和大地测量学领域的广泛应用¹⁾. 自 1973 年至今, 共有 10 个测高卫星 11 个测高仪发射到天空, 它们是 Skylab, Geos-3, Seasat, Geosat, ERS-1, ERS-2, Topex/Poseidon (T/P), GFO, Envisat 和 Jason-1, 其中 T/P 上有两个测高仪. 这些海洋测高计划收集并积累了一个十分庞大的测高数据集, 为研究人员研究海平面变化、地球重力场、海底地形、海洋岩石圈、海洋环流等领域提供了特别丰富的信息源^[1~6]. 国外一些研究机构利用这一丰富的信息源已先后确定出多个平均海面模型, 如: $3.75' \times 3.75'$ 格网分辨率的 OSU MSS95 模型²⁾、 $3.75' \times 3.75'$ 格网分辨率的 CLS_SHOM98.2 MSS 模型³⁾、 $3' \times 3'$ 格网分辨率的 GFZ MSS95A 模型、 $3.75' \times 3.75'$ 格网分辨率的

KMS99 MSS 模型^[7]等, 我国学者也利用卫星测高数据建立了中国海及邻海的 MSS 模型^[8,9]. 在这些平均海面模型中, 比较有代表性的是前 3 个模型. OSU MSS95 是美国俄亥俄州立大学(OSU)利用 Geosat, ERS-1 和 T/P 测高数据联合求出的一个较高精度的平均海面模型, 它是 Geosat 和 T/P 等测高卫星数据的参考海平面, 现较为广泛地应用于海洋学、地球物理学等学科的研究; GFZ MSS95A 是德国大地测量研究中心(GFZ)建立的一个平均海面模型, 它的上一个版本 MSS93A 是 ERS-1 测高数据的参考海平面; CLS_SHOM98.2 MSS 是由法国的卫星数据采集和定位机构(CLS)联合多种测高数据确定的分辨率为 $3.75' \times 3.75'$ 的一个高精度平均海面, 其最终目标是为 Jason-1 和 Envisat 等测高卫星的观测值提供参考海平面³⁾. 其中, Jason-1 已于 2001 年 12 月 7 日发射, Envisat 于 2002 年 2 月 28 日发射. 目前, 该领域的发展趋势是如何联合越来越多的重复轨迹数据和大地测量数据来确定更高分辨率、更高精度的平均海面. 制约获得更高分辨率、更高精度的平均海面的主要因素有: (1) 如何不断提高各种地球物理改正和环境改正模型的精度; (2) 进一步削弱轨道误差的影响, 虽然 T/P 已有很高的轨道精度, 但仍需进一步减弱 Geosat, ERS-1

1) 姜卫平. 卫星测高技术在大体测量学中的应用. 武汉大学博士学位论文, 2001

2) Yi Y C. Determination of gridded Mead Sea Surface from Topex, ERS-1 and Geosat altimeter data. Report No 434, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, 1995

3) Hernandez F, Schaeffer P. Altimetric Mean Sea Surface and Gravity Anomaly Maps Inter-comparisons. AVISO, Technical Report: AVI-NT-011-5242-CLS, 2000

4) 王海瑛. 中国近海卫星测高数据处理与应用研究. 中国科学院测量与地球物理研究所博士学位论文. 1999

和 ERS-2 的径向轨道误差,以提高测高平均海面的精度;(3) 基准统一的问题,不同年代不同任务的测高卫星所采用的地球参考坐标框架和地球椭球参数不同,即基准不一致也是影响提高平均海面精度的一个主要原因.

1 所用的数据与预处理

确定全球平均海面 WHU2000 所用的数据为:(1) 7 年的 T/P (11cycle~249cycle); (2) 全部的 ERS-1/168 数据,时间为 94.04~94.09 (phase E)和 94.10~95.03 (phase F); (3) 52 个周期的 ERS-2/35 (1cycle~52cycle); (4) 44 个周期的 Geosat/ERM (1cycle~44cycle).

数据的预处理方法为:以数据用户手册为基础,综合国内外同行的先进经验^[5,8,10~12] 1,2),采取了精度更高的地球物理改正模型,制定了比较全面的数据编辑准则³⁾,并利用该准则对 Geosat, ERS-1/2 和 T/P 等多代卫星测高原始数据进行了编辑处理,剔除了无效观测记录并做了相应的地球物理和环境改正.

2 数据处理及模型建立

2.1 时间平均海面高(time-average SSH)的获得

具有重复轨道任务测高卫星的地面轨迹并不重合在一起,其重复精度为 1~2 km. 为了减弱海面高的时变影响,特别是在某一特定时期发生的大范围海洋学异常现象如 El Niño 和 La Niña 现象所引起的海平面异常变化,应对具有重复轨道的测高数据计算时间平均海面高,并获得平均轨迹.

平均轨迹可通过参考轨迹与共线轨迹平均获得. 在选定或确定参考轨迹后,其他共线轨迹相应于参考轨迹上每一点的海面高可以通过两种方法获得,一种是通过对其共线轨迹上的海面高进行大地水准面梯度改正得到^[13] 1),另一种方法为共线法^{1,3)}. 本文采用共线法获得时间平均海面高,主要步骤为:分别对

238 个周期的 T/P, 52 个周期的 ERS-2/35 和 44 个周期的 Geosat/ERM 数据进行共线平均;剔除与平均值之差大于 1 m 的观测值;重新计算平均海面高,形成各测高卫星的平均轨迹.

共线平均后,对平均前后的交叉点不符值进行了统计,所得结果列于表 1. 表 1 表明通过时间平均可以减弱海面高的时变影响,提高海面高的精度(优于 10 cm).

2.2 大地测量任务数据的海面时变处理

对于具有重复轨道任务(如 ERS-1/2 35, Geosat/ERM 和 T/P)的测高卫星来说,其数据海面时变的影响可以通过多年的时间平均来削弱,而对于大地测量任务(如 ERS-1/168 和 Geosat/GM)的测高卫星数据却不能通过此方法得到削弱.

本文利用美国德克萨斯大学空间研究中心(CSR)的海面异常(SLA)模型来改正漂移轨道任务的测高卫星数据,以削弱海面时变对海面高的影响. 该模型由 T/P 数据确定,分别包括月平均和年平均海面异常. 改正的方法为:利用与 ERS-1/168 数据时间相应的月海面异常模型,对轨迹上每个点的海面高由位置与时间进行内插改正.

2.3 参考椭球的统一及参考框架的转换

不同年代不同任务测高卫星所采用的地球参考坐标框架和地球椭球参数是不同的,如 T/P 卫星数据的参考椭球长半径为 6378136.3 m,扁率为 298.257,而 ERS-2 和 ERS-1/168 的参考椭球长半径为 6378137 m,扁率为 298.257223563. 由于参考椭球的半径及扁率不一致,其海面高所表示的值也不一致(海面高为海面至参考椭球的距离),为了联合处理多种测高数据,必须将它们基准统一. 本文以 T/P 测高卫星的参考椭球参数与参考框架为基准,将其他测高卫星的时间平均海面高统一到该基准. 此方法通过两步实现:

表 1 共线平均前后交叉点不符值精度统计(单位: m)

测高数据	平均前			平均后		
	MEAN	RMS	STD	MEAN	RMS	STD
T/P	0.002	0.077	0.077	0.004	0.029	0.029
ERS-2	0.049	0.164	0.156	0.030	0.092	0.087
Geosat/ERM	0.058	0.121	0.106	0.015	0.074	0.073

1) 见 1187 页脚注 2)

2) Hwang C. High Precision Gravity Anomaly and Sea Surface Height Estimation from Geos-3/Seasat Altimeter data. Report No. 399. Dept. of Geod. Sci. and Surv. , Ohio State University, Columbus, 1989

3) 见 1187 页脚注 1)

第 1 步利用转换公式^[10]统一参考椭球参数; 第 2 步利用一个 4 个参数模型来实现参考框架的统一, 这 4 个参数为 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 和 B , 分别代表原点的 3 个偏移量和一个整体的偏移量¹⁾. 具体方法参见姜卫平²⁾和 Yi Y C¹⁾文.

2.4 多种测高数据联合交叉点平差

经过时间平均、基准统一处理后, 轨道误差、残余的海洋时变与各种物理改正误差等仍是影响海面高精度的主要因素, 因而有必要进行多种测高数据联合交叉点平差, 以更好地削弱这些误差的影响. 交叉点平差如不附加其他约束条件, 则存在着秩亏的问题, 因而平差时固定 T/P 的时间平均海面高. 此外固定 T/P 弧段的另一目的是将其他测高卫星数据基准进一步统一到 T/P 数据基准上.

目前普遍采用的交叉点平差方法是进行 Geosat 或 ERS-1(ERS-2)与 T/P 的双交叉点平差, 利用精密 T/P 轨道改进前者的轨道, 新发展的方法是包括轨道误差参数的多种数据的联合平差, 考虑误差协方差, 由此求得更平稳的数值解^{[5]2)}. 本文改进了双交叉点平差方法, 进行多种测高数据区域联合交叉点平差, 即将 ERS-2, Geosat/ERM 和 ERS-1/168 及 T/P 一起进行交叉平差. 平差时, 固定 T/P 的弧段. 确定交叉点的方式为升弧与降弧组合, 具体为: ERS-2~Geosat/ERM, ERS-2~ERS-2, ERS-2~ERS-1/168, ERS-2~T/P, ERS-1~Geosat/ERM, ERS-1~ERS-1, ERS-1~T/P, Geosat/ERM~Geosat/ERM 和 Geosat/ERM~T/P 等 9 种组合. 此外, 在平差中, 还引入了大地水准面和海面地形模型等先

验数据.

采用高阶多项式拟合轨道误差并在较小的区域内进行交叉点平差会获得更好的效果¹⁾. 为了选择交叉点平差时采用的合适区域, 在北纬 0°~20°和经度 0°~190°区域里进行了测试. 方法为: 分别取 20°×20°(北纬 0°~20°, 经度为 160°~180°)块、20°×90°(北纬 0°~20°, 经度为 0°~100°)块和 20°×190°块进行交叉点平差, 然后根据比较结果确定最优区域大小. 得到的统计结果如表 2 所示.

由表 2 可知, 在测试的区域里, 平差后, 20°×20°块的交叉点不符值 RMS 要较 20°×190°的小 15%左右, 较 20°×90°的小 8%左右. 考虑到交叉点不符值的精度、测高数据的分布(在南、北纬 82°之间)及陆地的分布情况, 本文选择 20°×90°为基本区域, 将全球海域分为 29 块进行区域交叉点平差, 其中北半球 14 块(从 A1 至 A14), 南半球 15 块(从 B1 至 B15). 具体划分如图 1 所示.

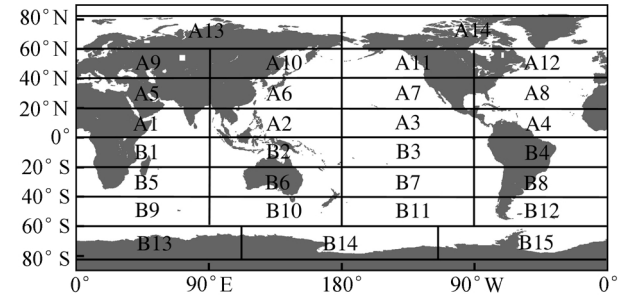


图 1 交叉点平差区域划分图

表 2 不同区域的平差前后交叉点不符值精度(RMS)统计结果(单位: m)

	20°×20°		20°×90°		20°×190°	
	平差前	平差后	平差前	平差后	平差前	平差后
ERS-2/ERS-2(35-day)	0.084	0.019	0.065	0.019	0.081	0.025
ERS-2(35-day)/Geosat	0.239	0.026	0.183	0.029	0.231	0.033
ERS-2(35-day)/ERS-1(168-day)	0.262	0.082	0.268	0.089	0.267	0.093
Geosat/Geosat	0.038	0.022	0.077	0.025	0.075	0.034
Geosat/ERS-1(168-day)	0.461	0.083	0.394	0.092	0.438	0.092
ERS-1/ERS-1(168-day)	0.195	0.113	0.250	0.122	0.230	0.123
TP/ERS-2(35-day)	0.070	0.020	0.056	0.020	0.066	0.027
TP/Geosat	0.191	0.024	0.170	0.026	0.204	0.028
TP/ ERS-1(168-day)	0.292	0.088	0.266	0.092	0.273	0.092

1) 见 1187 页脚注 2)
2) 见 1187 页脚注 1)

分别在 29 块进行多种测高数据的联合交叉点平差计算,交叉点统计结果如表 3 所示,平差前后交叉点不符值精度(RMS)如表 4 所示. 由表 4 可知,交叉点平差后,除了与 ERS-1/168 相关的交叉点不符值在 10.0 cm 左右外,其余的都优于 4.0 cm. 由此可知,通过联合交叉点平差,不仅大大地提高了 ERS1/168, ERS2 和 Geosat 数据的径向轨道精度,而且也较系统地统一了各种数据的基准.

2.5 格网化方法

交叉点平差后, T/P, ERS-2, Geosat/ERM 和 ERS-1/168 可用的总观测量的个数为 16378963. 本文采用的格网化方法为 Shepard 方法,格网分辨率为 $2' \times 2'$. 计算时,局部拟合半径取 2 倍的格网间距($S = 4'$),同时应保证拟合的范围内至少有两个点,如不能满足条件,则将局部拟合半径扩大到 $8'$,甚至更大.

此外,不同卫星测高数据的观测精度是不一致的. 联合处理时,对离散点格网化应该顾及到观测值的精度. 观测值海面高的精度可由交叉点平差后的不符值精度除以 $\sqrt{2}$ 获得. 由此,从表 4 可知 ERS-1/168 的海面高精度在 8 cm 左右, T/P, ERS-2 和 Geosat/ERM 均在 2 cm 左右. 格网化时,依据这些值确定它们权的大小.

所确定的分辨率为 $2' \times 2'$ 的全球平均海面 WHU2000 如图 2. 考虑到 T/P, ERS-2, Geosat/ERM 和 ERS-1/168 平差后海面高观测值的精度及格网化的误差, WHU2000 MSS 平均海面高模型的精度应优于

5 cm.

3 结果比较及分析

作为外部检核,将 WHU2000 MSS 与 CLS_SHOM98.2 MSS, GFZ MSS95A 以及 OSU MSS95 等 3 种全球平均海面模型进行了数值比较,以验证其正确性. 其中,与前两个模型进行了格网值比较;由于尚未得到 OSU MSS95 模型的格网值,本文利用 Geosat, ERS-2 和 T/P 原始数据中给出的 OSU MSS95 模型内插值进行了比较. 所得结果见表 5 和表 6. 表 5 为全部点的比较结果,表 6 为去掉差值大于 3 倍 RMS(对于 CLS_SHOM98.2 MSS 和 OSU MSS95 为 0.5 m,而对于 GFZ MSS95A 为 1.2 m)的点后的比较结果. 表 5, 6 中 CLS_SHOM98.2 MSS 和 GFZ MSS95A 分别与 OSU MSS95 的比较结果,由 F. Hernandez 和 M. Rentsch 提供.

如表 6 所示, WHU2000 MSS, CLS_SHOM98.2 MSS 和 OSU MSS95 差值的 STD 分别为 0.090 和 0.079 m,与 GFZ MSS95A 差值的 STD 为 0.211 m. GFZ MSS95A 与其他 3 个模型相差较大的原因是其参考基准所用的重力场模型不同. GFZ MSS95A 参考基准为 ERS1,其轨道确定时所用的重力场模型为 PGM035,其他 3 个模型参考基准为 T/P,轨道确定时所用的重力场模型为 JGM-2. 比较结果表明本文所确定的 WHU2000 MSS, CLS_SHOM98.2 MSS 和 OSU MSS95 的精度相当,但分辨率却高于它们.

表 3 交叉点统计结果

测高数据	T/P	ERS-2	Geosat/ERM	ERS-1/168
T/P	/	42862	20402	349477
ERS-2		44845	69240	740610
Geosat/ERM			16083	572796
ERS-1/168				3309622
合计	5165937			

表 4 平差前后交叉点不符值精度(RMS)统计(单位: m)

测高数据	T/P	ERS-2	Geosat/ERM	ERS-1/168
交叉点平差前				
T/P	0.0290	0.070	0.144	0.236
ERS-2		0.090	0.162	0.253
Geosat/ERM			0.071	0.319
ERS-1/168				0.246
交叉点平差后				
T/P	0.0290	0.022	0.034	0.092
ERS-2		0.024	0.036	0.093
Geosat/ERM			0.029	0.096
ERS-1/168				0.114

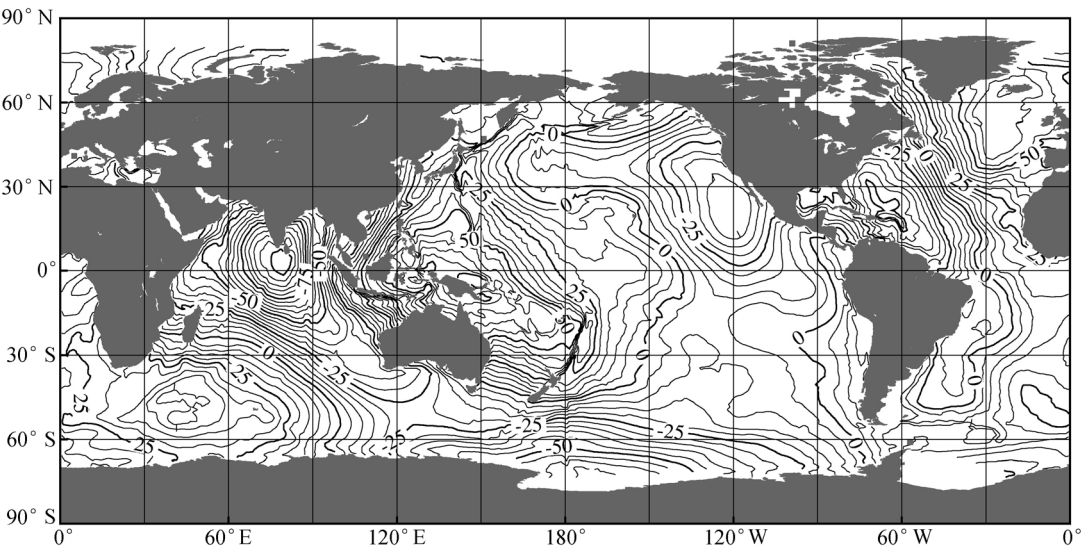


图 2 2'×2'的全球平均海面 WHU2000 MSS(范围为纬度±82°)

表 5 不同全球平均海面高模型的比较(范围为纬度±82°, 单位: m)

	MEAN	RMS	STD	比较的点数
WHU2000 MSS-CLS_SHOM98. 2	0.041	0.175	0.169	9190755
WHU2000 MSS-GFZ MSS95A	-0.367	0.437	0.237	14153429
WHU2000 MSS-OSU MSS95	-0.071	0.112	0.087	2754722
CLS_SHOM98. 2-OSU MSS95	0.000	0.102	0.102	9603934
GFZ MSS95A-OSU MSS95	0.277	0.240	0.138	未统计

表 6 不同全球平均海面高模型的比较(范围为纬度±82°, 差值不符值<0.5 m. 单位: m)

	MEAN	RMS	STD	比较的点数
WHU2000 MSS-CLS_SHOM98. 2	0.042	0.099	0.090	9005065
WHU2000 MSS-GFZ MSS95A	-0.361	0.418	0.211	14056477
WHU2000 MSS-OSU MSS95	-0.071	0.106	0.079	2752025
CLS_SHOM98. 2-OSU MSS95	0.005	0.078	0.078	8750055

致谢 对法国 CLS 的 Fabrice Hernandez 博士和德国 GFZ 的 Matthias Rentsch 博士提供数据及相关资料表示谢意。此外, 感谢 ESA 提供 ERS-1 和 ERS-2 测高数据, NOAA 提供 Geosat 测高数据, CNES 提供 Topex/Poseidon 测高数据。本工作受国家杰出青年科学基金(批准号: 49625408)资助。

参 考 文 献

1 王海瑛, 许厚泽, 王广运. 中国近海 1992~1998 海面变化监测与分析. 测绘学报, 2000, 29(增刊): 32~37

2 Li J. A formula for computing the gravity disturbance from the second radial derivative of the disturbing potential. Journal of Geodesy, 2002, 76(4): 226~231

3 Rapp R H, Yi Y C, Wang Y M. Mean Sea Surface and Geoid Gradient Comparisons with TOPEX Data. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(C12): 24657~24667

4 Rummel R, Sanso F. Satellite Altimetry in Geodesy and Oceanography. Berlin: Springer-Verlag, 1993. 250~280

5 Wang Y M. The satellite altimeter data derived mean sea surface GSFC98. Geophysical Research Letters, 2000, 27(5): 701~704

6 李立, 许金电, 蔡榕硕. 20 世纪 90 年代南海海平面的上升趋势: 卫星高度计观测结果. 科学通报, 2002, 47(1): 59~62

7 Knudsen P, Andersen O B. Global marine gravity field and mean sea surface from multi-mission satellite altimetry. In: Forsberg R, Feissel D, eds. Geodesy on the Move, Gravity, Geoid, Geodynamics and Antarctica, Processing IAG Scientific Assembly. Berlin: Springer, 1998. 132~138

8 邓晓丽, 晁定波, 陈俊勇. 中国近海 TOPEX/POSEIDON 卫星测高数据处理的初步结果. 测绘学报, 1996, 21(3): 226~232

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

10 陈俊勇, 李建成, 晁定波. 用 Topex/Poseidon 测高数据确定中国海域及邻海的海面高及海面地形. 武汉测绘科技大学学报, 1995, 20(4): 321~326

11 Denker H, Rapp R H. Geodetic and oceanographic results from the analysis of 1 year of Geosat Data. Journal of Geophysical Research, 1991, 95(C8): 13151~13168

12 Karagano T, Kamachi M. Global statistical space-time scales of oceanic variability estimated from the T/P altimeter. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(C1): 955~974

13 Brenner A C, Koblinsky C J, Beckley C J. A Preliminary estimate of geoid-induced variations in repeat orbit satellite altimeter observations. J Geophys Res, 1990, 95: 3033~3040

(2001-12-17 收稿, 2002-05-20 收修改稿)