

基于多波束激光测高卫星 ICESat-2 观测的垂线偏差解算

刘新¹, 回桂华¹, 周爱民², 郭金运¹, 宋孟昊¹, 张聪¹, 刘亚亭¹

(1. 山东科技大学测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590; 2. 巨野县农业农村局, 山东 巨野 274900)

摘要:卫星测高技术中,传统的微波雷达海洋测高卫星轨道倾角近 90° ,且只能利用沿轨海面高数据计算垂线偏差,导致其解算垂线偏差卯酉分量比子午分量精度差。ICESat-2 搭载的 ATLAS 系统可同时发射 6 条激光波束测量海面高,有望通过计算跨轨垂线偏差来提高卯酉分量精度。本研究以中国南海($0^\circ\text{N}\sim 30^\circ\text{N}$, $105^\circ\text{E}\sim 125^\circ\text{E}$)为研究区域,基于 ICESat-2 海面高产品 ATL12 计算沿轨垂线偏差和跨轨垂线偏差,并利用最小二乘配置法反演 $1'\times 1'$ 规则网格垂线偏差。实验结果表明:ICESat-2 沿轨海面高数据解算的子午分量和卯酉分量与 XGM2019e_2159-DOV 模型的验证精度分别为 $0.90''$ 和 $1.91''$,子午分量精度明显高于卯酉分量。而跨轨海面高数据解算的子午分量和卯酉分量与 XGM2019e_2159-DOV 模型的验证精度分别为 $2.63''$ 和 $1.66''$,卯酉分量精度明显提高且高于子午分量。

关键词:卫星测高;冰、云和陆地高程卫星二号(ICESat-2);高级地形激光测高系统(ATLAS);垂线偏差;最小二乘配置
中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A

Deflections of the vertical determination based on multi-beam laser altimetry satellite ICESat-2 data

LIU Xin¹, HUI Guihua¹, ZHOU Aimin², GUO Jinyun¹, SONG Menghao¹, ZHANG Cong¹, LIU Yating¹

(1. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Juye County Agriculture and Rural Bureau, Juye 274900, China)

Abstract: In satellite altimetry, the traditional microwave radar ocean altimeter satellite has an orbital inclination of nearly 90° and only along-track deflection of vertical can be calculated by using along-track sea surface height data, resulting in the lower precision of the prime vertical component than that of the meridian component. ICESat-2 is equipped with an ATLAS system that can simultaneously transmit six laser beams to measure the sea surface height, which is expected to improve the precision of the prime vertical component by calculating the cross-track deflection of the vertical. In this paper, ICESat-2's sea surface height product, ATL12, was used to calculate the along-track deflection of the vertical and cross-track deflection of vertical in the South China Sea ($0^\circ\text{N}\sim 30^\circ\text{N}$, $105^\circ\text{E}\sim 125^\circ\text{E}$). The $1'\times 1'$ gridded deflection of the vertical was inverted by using the least-squares collocation method. The results show that the meridian and prime vertical components calculated by the along-track sea surface height data are verified by XGM2019e_2159-DOV model with the precision of $0.90''$ and $1.91''$ respectively. The precision of the meridian component is significantly higher than that of the prime vertical component. The meridional and prime vertical components calculated by cross-track sea surface height data are verified by XGM2019e_2159-DOV model with the precision of $2.63''$ and $1.66''$, respectively. The precision of the prime vertical component is improved and higher than that of the meridian component.

Key words: satellite altimetry; ice, cloud and land elevation satellite-2 (ICESat-2); advanced topographic laser altimeter system(ATLAS); deflection of the vertical; least-squares collocation

收稿日期:2022-11-09

基金项目:国家自然科学基金项目(42274006,42192535,42242015)

作者简介:刘新(1969—),女,山东肥城人,副教授,博士,主要从事时空数据处理、机器学习的研究。

E-mail: xinliu1969@126.com

垂线偏差(deflection of the vertical,DOV)是地面任一点的重力方向与该点相应的参考椭球面法线方向间的夹角,可表示为卯酉分量和子午分量^[1]。垂线偏差广泛应用于计算天文观测数据、推算参考椭球参数和反演重力异常等领域,是地球科学计算中不可或缺的重要参数^[2]。20 世纪初,人们通过验潮站、浮标和海洋舰船等传统方法测量海洋 DOV,但这种耗费大量人力和时间的常规测量方法很难获得广阔海域的 DOV^[3-4]。而迅速崛起的卫星测高技术可快速观测全球海域范围内的海面高度信息,弥补了传统测量方法的缺陷^[5]。目前,卫星测高数据已成为各国科学家和学者构建海洋垂线偏差模型的重要数据源^[6]。

测高卫星的轨道倾角通常接近 90°,在利用沿轨海面高数据计算垂线偏差时,子午分量精度明显高于卯酉分量^[7]。联合多种卫星测高数据和重力异常数据,采用最小二乘方法和 Vening-Meinesz 公式构建的西太平洋海域(0°N~40°N,105°E~145°E)网格垂线偏差模型卯酉分量的均方根是子午分量的 2~3 倍^[8]。另外,基于海洋二号 A 卫星/大地测量任务(Haiyang-2A/Geodetic Mission, HY-2A/GM)数据计算的孟加拉湾海域的垂线偏差,其子午分量精度也高于卯酉分量精度^[9]。如何改善网格垂线偏差分量精度不平衡问题,是当前海洋大地测量研究面临的主要问题之一。卫星高度计解算的垂线偏差精度和分辨率与测距精度和空间分布有关。2010 年发射的近极轨卫星 Cryosat-2 在赤道处的轨道间距达 2.5 km,其海面高数据的沿轨空间分辨率比传统高度计提高了 20 倍,反演的重力异常精度也是传统测高卫星的 2 倍。但 Cryosat-2 密集的轨道覆盖无法进行跨轨方向海面高数据的差分计算,因此不能解算出高精度的卯酉分量^[10]。值得期待的是,地表水和海洋地形(surface water and ocean topography,SWOT)卫星于 2022 年 12 月 16 日成功发射升空,SWOT 全面工作后可同时获得高精度和高空间分辨率的二维海面高数据,有望改善垂线偏差分量精度差异大的问题。

冰、云和陆地高程卫星二号(ice, cloud and land elevation satellite-2, ICESat-2)作为一种新型激光测高卫星,能够更精确高效地观测极地冰盖变化、全球海面上升、全球植被高度等^[11]。ICESat-2 搭载的高级地形激光测高系统(advanced topographic laser altimeter system, ATLAS)携带了 2 个激光器、1 个主激光器和 1 个备用激光器,激光波长为 532 nm,脉冲频率为 10 kHz。每个脉冲大约有 20 万亿个光子从 ATLAS 发射,但仅有少量光子会返回卫星。由于 ICESat-2 激光器的功率限制,对于冰盖等高反射面,强波束和弱波束均可提供有效的地表高程信息,而面对海洋等低反射面,弱波束会损失一半以上的数据来降低激光器的负荷,以提高探测效率^[12]。ICESat-2 的多波束同步观测模式不仅提高了海面高数据的空间分辨率,也为研究跨轨垂线偏差提供了可能,有望获得高精度的卯酉分量以弥补传统雷达测高卫星的不足。

ICESat-2 的 ATL12 产品提供的全球海面高数据可用于反演海洋 DOV,本研究利用跨轨方向的海面高数据解算垂线偏差,借此提高卯酉分量精度。以中国南海(0°N~30°N,105°E~125°E)为研究区域,将同时时间序列的 Jason-3 海面高数据作为参照,通过计算交叉点不符值精度验证 ICESat-2 海面高产品的可靠性。然后,利用沿轨和跨轨海面高数据,根据最小二乘配置法分别计算南海网格垂线偏差,并用 XGM2019e_2159-DOV 模型进行精度验证。

1 研究区及数据

1.1 研究区

如图 1 所示,南海海域(0°N~30°N,105°E~125°E)属中国三大边缘海之一,位于中国大陆的南端,海域内分布着东沙群岛、西沙群岛、中沙群岛和南沙群

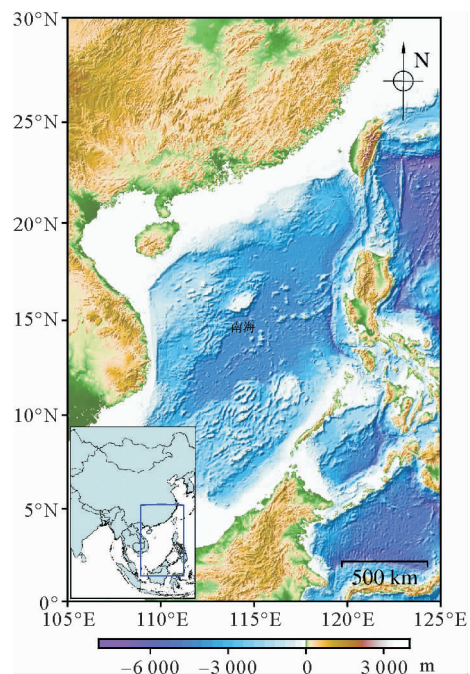


图 1 南海地理位置图

Fig. 1 Geographical location map of the South China Sea

岛等众多的岛礁。南海海底地形复杂,地质构造复杂,自然资源丰富。除了拥有丰富的石油资源和渔业资源,南海地处太平洋与印度洋之间的咽喉地带,是多条国际海运线和航空运输线的必经之地,是重要的海上通道。因此,深化对南海海底地质活动与环境变化的认识,为南海资源勘探与工程建设提供基础地质信息支撑,成为我国海洋学研究的一项重要任务。

1.2 ICESat-2 海面高数据

ICESat 卫星携带的地球科学激光高度计系统(geoscience laser altimeter system, GLAS)只有一束激光,每秒仅发射 40 个脉冲。ICESat 卫星失效后,美国国家宇航局(national aeronautics and space administration, NASA)于 2018 年 9 月成功发射新一代星载激光雷达卫星 ICESat-2。ICESat-2 卫星轨道高度 592 km,轨道倾角 92° ,轨道周期为 91 d。ICESat-2 卫星搭载的 ATLAS 是一种探测灵敏度为光子级的激光雷达系统,每秒发射 10 000 个激光脉冲,沿地面轨迹每隔 0.7 m 发射 1 个激光脉冲,每个激光脉冲被 ATLAS 中的衍射光学元件分裂,产生 6 束单独的波束,分成 3 对排列,一强一弱,如图 2 所示。波束组之间的跨轨方向距离约 3.3 km,组内波束距离为 90 m,组内沿波束方向的距离为 2.5 km。每对波束中的强弱波束具有不同的传输能量,强波束和弱波束之间的能量比为 $4:1$ ^[13]。ATLAS 的强波束和弱波束之间的映射及其在地面上的相对位置取决于 sc_orient (spacecraft orientation)值。当 $sc_orient=0$ 时,L 波束即左波束为强波束;当 $sc_orient=1$ 时,R 波束即右波束为强波束。

由于弱波束在海洋区域没有连续的观测值,本研究根据 sc_orient 值,一个周期只筛选 3 条强波束数据用于南海垂线偏差解算,并将筛选的强波束数据分为 L 波束或者 R 波束。

ICESat-2 卫星有 Level-1、Level-2、Level-3A、Level-3B 三级数据产品,其中,Level-3A 级产品中的 ATL12 产品提供世界海洋范围($88^\circ\text{S}\sim 88^\circ\text{N}$)的海面高数据,ATL12 海面高数据是 ATL03 数据通过添加不同的地球物理校正获得,包括大气延迟、海况偏差、海洋潮汐、固体地球潮汐、极地潮汐和逆气压计效应等。本研究采用的 ICESat-2 强波束海面高数据第五版的时间序列为 2018 年 10 月 13 日至 2022 年 4 月 4 日(cycle01-cycle15),筛选出的强波束 1L~3L 和 1R~3R 在南海区域的地面轨迹如图 3 所示。

1.3 Jason-3 海面高数据

Jason-3 卫星是由美国国家海洋和大气管理局(national oceanic and atmospheric administration, NOAA)、欧洲气象卫星开发组织(European organization for the exploitation of meteorological satellites, EUMETSAT)和法国国家航天中心(international charter space and major disasters, CNES)合作发射的测高卫星^[14]。Jason-3 的轨道高度为 1 336 km,倾角为 66° ,轨道周期为 10 d。在本研究中,对 Jason-3/ERM(expect repetitive orbit mission)

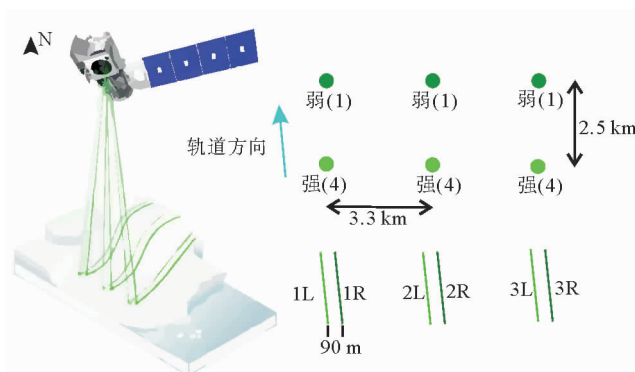


图 2 ATLAS 的 3 个波束组位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the positions of the three beam groups of ATLAS

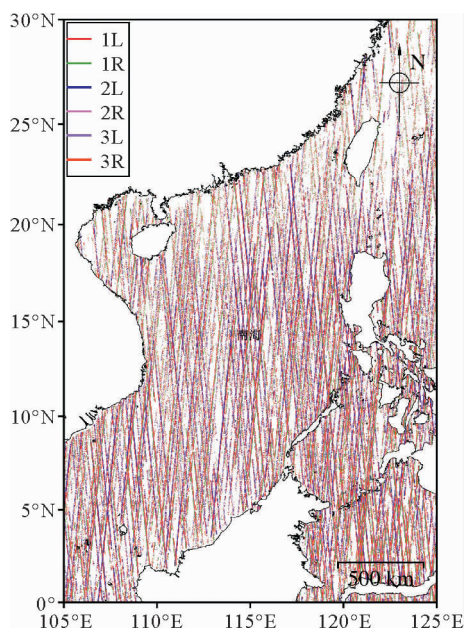


图 3 ICESat-2 的南海地面轨迹

Fig. 3 Ground track of ICESat-2 in the South China Sea

在本研究中,对 Jason-3/ERM(expect repetitive orbit mission)

1 Hz 海面高数据进行地球物理校正,包括干对流层和湿对流层路径延迟、电离层校正、海况偏差、海洋潮汐、固体地球潮汐、极地潮汐、高频风效应和逆气压计效应等。Jason-3 海面高数据的时间序列为 2018 年 10 月 16 日至 2022 年 4 月 7 日(cycle099-cycle226),其在南海区域的 Jason-3 观测点地面轨迹如图 4 所示。

1.4 海面地形模型和垂线偏差验证模型

海面地形模型 MDT_CNES-CLS18 由 AVISO 发布,该模型数据来源为重力与海洋环流实验(gravity and ocean circulation experiment, GOCE)重力数据、重力恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment, GRACE)重力数据、表层速度计划数据(surface velocity program, SVP)、地转海洋学实时观测矩阵数据(array for real-time geostrophic oceanography, Argo)、水文剖面数据(CORIOLIS dataset for re-analysis, CORA)和卫星测高数据,其网格分辨率为 7.5'。

大地水准面模型 XGM2019e_2159-geoid 和垂线偏差模型 XGM2019e_2159-DOV 是根据 XGM2019e_2159 获得的。其中,XGM2019e_2159 是一个组合全球重力场模型,该模型球谐系数的阶次为 2 159,解算球谐系数的数据来源为组合卫星模型 GOCO06s、地面重力异常数据集以及由海洋测高和大陆地形得出的重力异常数据集。

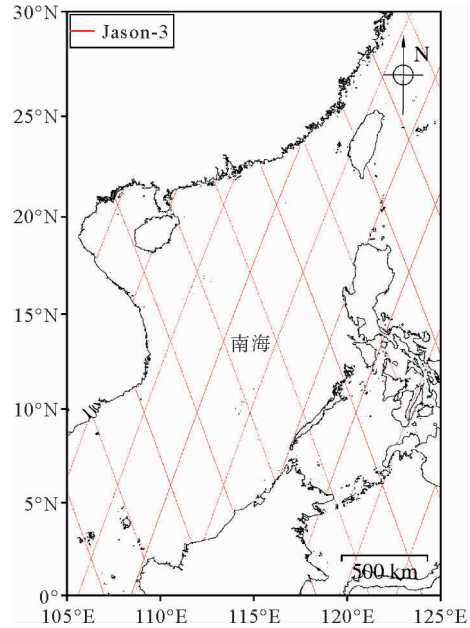


图 4 Jason-3 的南海地面轨迹

Fig. 4 Ground track of Jason-3 in the South China Sea

2 方法

2.1 沿轨垂线偏差

在计算垂线偏差前,首先将 ICESat-2 海面高数据减去海面地形(MDT_CNES_CLS18 模型),并进行粗差剔除。为进一步减弱海面高的高频误差,需对 ICESat-2 海面高数据进行高斯滤波,以降低海面变化和数数据噪声的影响,对应的响应函数为:

$$x = e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}} \tag{1}$$

其中: d 为相邻两点的球面距离, σ 为滤波窗口半径即滤波参数。ICESat-2 海面高数据相邻两观测点间的球面平均距离为 3~4 km。

利用两个相邻观测点的海面高度差及其球面距离计算沿轨垂线偏差:

$$\epsilon(\alpha) = \frac{N_q - N_p}{S} \tag{2}$$

其中: p 和 q 为相邻两观测点, N_p 为 p 点大地水准面高, N_q 为 q 点大地水准面高, α 为 p 和 q 两点间的方位角, S 为沿 α 方向 p 、 q 两点的球面距离, $\epsilon(\alpha)$ 为沿 α 方向 p 、 q 两点中点的 DOV。

2.2 网格垂线偏差

沿方向 α 的垂线偏差 ϵ 与其子午分量 ξ 和卯西分量 η 之间的关系式为:

$$\epsilon = \xi \cos \alpha + \eta \sin \alpha \tag{3}$$

其中, α 的计算公式为:

$$\tan \alpha = \frac{\cos \varphi_q \sin(\lambda_q - \lambda_p)}{\cos \varphi_p \sin \varphi_q - \sin \varphi_p \cos \varphi_q \cos(\lambda_q - \lambda_p)} \tag{4}$$

通过最小二乘配置法计算规则网格 DOV 的子午分量 ξ 和卯西分量 η , 其计算公式为:

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_{\xi\epsilon} \\ \mathbf{C}_{\eta\epsilon} \end{pmatrix} (\mathbf{C}_{\epsilon\epsilon} + \mathbf{C}_n)^{-1} \epsilon \quad (5)$$

其中: $\mathbf{C}_{\xi\epsilon}$ 为子午分量 ξ 和沿轨垂线偏差 ϵ 的协方差矩阵; $\mathbf{C}_{\eta\epsilon}$ 为卯酉分量 η 和沿轨垂线偏差 ϵ 的协方差矩阵; $\mathbf{C}_{\epsilon\epsilon}$ 为沿轨垂线偏差的方差矩阵; \mathbf{C}_n 为沿轨垂线偏差的噪声方差矩阵。

垂线偏差分量 (ξ, η) 的方差函数并非各向同性的,但 DOV 的纵向分量 l 和横向分量 m 的方差函数却为各向同性,可以通过纵向分量 l 和横向分量 m 的方差函数计算矩阵 $\mathbf{C}_{\xi\epsilon}$ 、 $\mathbf{C}_{\eta\epsilon}$ 、 $\mathbf{C}_{\epsilon\epsilon}$ 。在点 p 处的网格 DOV 的子午分量和卯酉分量 (ξ_p, η_p) 由 DOV 的纵向和横向分量 (l_p, m_p) 计算得到:

$$\xi_p = l_p \cos \alpha_{pq} - m_p \sin \alpha_{pq}, \quad (6)$$

$$\eta_p = l_p \sin \alpha_{pq} + m_p \cos \alpha_{pq}. \quad (7)$$

由 (l_p, m_p) 和 (l_q, m_q) 计算点 p 和 q 的沿轨垂线偏差 ϵ_p, ϵ_q 分别为:

$$\epsilon_p = l_p \cos(\alpha_{\epsilon_p} - \alpha_{qp}) + m_p \sin(\alpha_{\epsilon_p} - \alpha_{qp}), \quad (8)$$

$$\epsilon_q = l_q \cos(\alpha_{\epsilon_q} - \alpha_{qp}) + m_q \sin(\alpha_{\epsilon_q} - \alpha_{qp}). \quad (9)$$

其中: α_{ϵ_p} 和 α_{ϵ_q} 分别表示沿轨 DOV 在点 p 和 q 的方位角; α_{qp} 表示从 q 到 p 的方位角。

因此,网格 DOV 的方向分量与沿轨 DOV 之间的协方差矩阵 $(\mathbf{C}_{\xi\epsilon}, \mathbf{C}_{\eta\epsilon})$, 以及沿轨 DOV 的方差矩阵 $\mathbf{C}_{\epsilon\epsilon}$ 的计算公式分别为:

$$\mathbf{C}_{\xi\epsilon} = \mathbf{C}_{ll} \cos \alpha_{pq} \cos(\alpha_{\epsilon_q} - \alpha_{qp}) - \mathbf{C}_{mm} \sin \alpha_{pq} \sin(\alpha_{\epsilon_q} - \alpha_{qp}), \quad (10)$$

$$\mathbf{C}_{\eta\epsilon} = \mathbf{C}_{ll} \cos \alpha_{pq} \cos(\alpha_{\epsilon_q} - \alpha_{qp}) + \mathbf{C}_{mm} \sin \alpha_{pq} \sin(\alpha_{\epsilon_q} - \alpha_{qp}), \quad (11)$$

$$\mathbf{C}_{\epsilon\epsilon} = \mathbf{C}_{ll} \cos(\alpha_{\epsilon_p} - \alpha_{qp}) \cos(\alpha_{\epsilon_q} - \alpha_{qp}) + \mathbf{C}_{mm} \sin(\alpha_{\epsilon_p} - \alpha_{qp}) \sin(\alpha_{\epsilon_q} - \alpha_{qp}). \quad (12)$$

其中,纵向分量方差矩阵 \mathbf{C}_{ll} 和横向分量方差矩阵 \mathbf{C}_{mm} 的计算见文献[15]。

2.3 跨轨垂线偏差

ICESat-2 激光脉冲受观测条件的限制,3 条强波束的海面高可能存在少量观测数据缺失。为了获取跨轨方向时间最接近的海面高数据,筛选 2 条计算波束上观测时间差在 1 s 以内的海面高数据用于计算跨轨 DOV。图 5 展示了计算跨轨垂线偏差的示意图,一个周期内可以根据 sc_orient 值筛选出 3 条强波束,图 5 按照从左到右的顺序位次标识为:1S、2S、3S,将 3 条强光束两两配对形成 1S_2S、2S_3S、1S_3S 三对跨轨组合来计算跨轨 DOV。在后续计算中再将 S 区分成 L 或 R,形成 6 组跨轨组合。

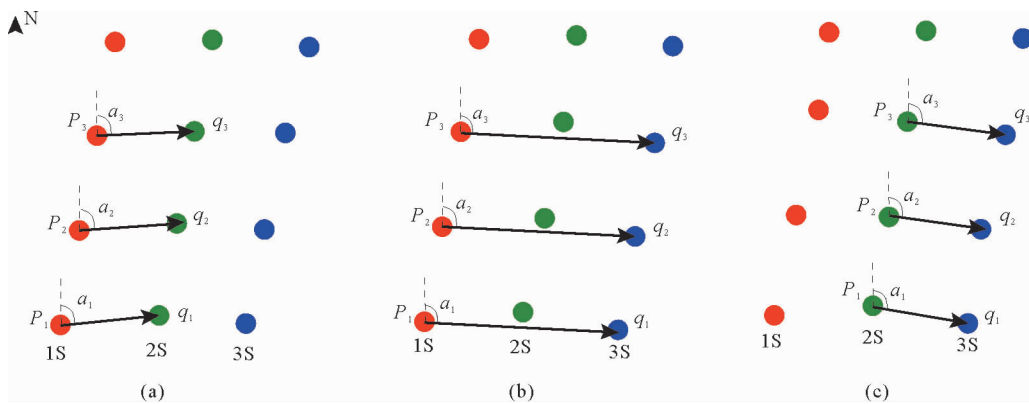


图 5 计算跨轨垂线偏差示意图

Fig. 5 Schematic diagram of calculating cross-track deflection of the vertical

将筛选后的海面高数据与 XGM2019e_2159-geoid 模型进行验证,其统计结果见表 1。由表 1 可知,为了与海面高数据量较少的中间强波束进行配对,两侧的强波束剔除数据的比率较高。根据沿轨海面高数据解算网格 DOV 的方法,将 2.2 节中的沿轨 DOV 替换成跨轨 DOV,即可解算出跨轨海面高确定的南海网格 DOV。

表1 ICESat-2海面高数据与XGM2019e_2159-geoid模型差值统计表

Table 1 The difference between ICESat-2 sea surface height data and XGM2019e_2159-geoid model

波束	剔除比率/%	剩余数量/个	最大值/cm	最小值/cm	平均值/cm	标准偏差/cm
1L	24.34	284 948	336.35	-273.68	48.93	17.49
2L	4.23	284 948	430.99	-307.25	49.17	21.86
3L	22.06	284 948	467.32	-282.72	49.05	17.38
1R	26.32	266 383	402.89	-175.97	47.80	16.80
2R	4.01	266 382	527.64	-241.39	48.41	21.57
3R	24.25	266 383	446.90	-196.15	47.02	16.73

3 结果与讨论

3.1 海面高数据精度

本研究通过对比 ICESat-2 和 Jason-3 的交叉点不符值精度,来说明 ICESat-2 海面高数据的可靠性。选择 91 d 的轨道周期作为时间阈值,采用文献[16]改进的纬度做差法求交叉点的位置。ICESat-2 和 Jason-3 交叉点海面高不符值统计信息见表 2。从表 2 可以看出,ICESat-2 海面高的 6 条波束交叉点不符值的标准偏差相近,Jason-3 自交叉点不符值的精度高于 ICESat-2 的。

表2 ICESat-2和Jason-3的91d内交叉点海面高不符值统计

Table 2 The crossover difference in 91 days for ICESat-2 and Jason-3

波束	数量/个	最大值/cm	最小值/cm	平均值/cm	标准偏差/cm
1L	3 502	35.08	-36.43	-0.88	11.18
2L	3 117	32.82	-34.47	-1.01	10.58
3L	3 539	33.91	-34.33	-0.67	10.72
1R	3 600	37.99	-38.86	-1.18	12.21
2R	3 206	36.50	-37.90	-0.91	11.68
3R	3 764	38.78	-40.06	-0.56	12.32
ICESat-2	73 713	36.99	-38.84	-0.96	11.89
Jason-3	61 825	37.13	-37.09	0.04	10.07

3.2 沿轨垂线偏差

由于反演的垂线偏差数据平滑度会随着高斯滤波参数的增大而增大,为了合理降低数据噪声的影响并保证海面高数据的质量,应选择合适的滤波窗口。ICESat-2 相邻两点间的球面平均距离为 3~4 km,因此滤波参数 σ 选择 4 km 的倍数。本研究计算不同滤波参数下的网格垂线偏差和 XGM2019e_2159-DOV 模型差值的标准偏差,统计结果见表 3。如表 3 所示,当 σ 为 12 km 时,过度滤波导致精度反而较差。因此选择滤波参数为 8 km。

沿轨海面高数据进行一次差分计算可有效抑制轨道误差等长波误差项的影响,基于式(2)解算出沿轨垂线偏差。使用 XGM2019e_2159-DOV 模型进行精度验证,统计结果见表 4。从表 4 可以看出,中间强波束 2L、2R 的 DOV 精度优于两侧强波束,但从计算的 DOV 数量来看,中间强波束 2L、2R 的海面高观测点不如两侧强波束密集。

表 3 不同高斯滤波参数下反演的网格 DOV 与 XGM2019e_2159-DOV 模型差值的标准偏差

Table 3 The difference between the gridded DOV in different Gaussian filter windows and XGM2019e_2159-DOV model (")

沿轨	方向	σ/km		
		4	8	12
ICESat-2_XGM2019	子午	1.03	0.90	0.92
	卯酉	2.12	1.91	1.97

表 4 ICESat-2 沿轨 DOV 与 XGM2019e_2159-DOV 模型差值统计表

Table 4 The difference between ICESat-2 along-track DOV and XGM2019e_2159-DOV model

波束	数量/个	最大值/(")	最小值/(")	平均值/(")	标准偏差/(")
1L_XGM2019	336 340	3.87	-3.86	0.01	1.27
2L_XGM2019	262 951	3.69	-3.68	0.02	1.19
3L_XGM2019	325 946	3.84	-3.26	0.03	1.25
1R_XGM2019	303 125	3.90	-3.90	0.01	1.29
2R_XGM2019	245 319	3.72	-3.73	-0.01	1.21
3R_XGM2019	314 708	3.93	-3.92	0.04	1.30
ICESat-2_XGM2019	1 730 128	3.83	-3.53	0.02	1.15

ICESat-2 沿轨 DOV 利用最小二乘配置法反演的南海网格 DOV 模型如图 6 所示,采用 XGM2019e_2159-DOV 模型进行精度验证的统计结果见表 5。由表 5 可知,由于 ICESat-2 的轨道倾角为 92° ,子午分量精度明显高于卯酉分量。中间组强波束 2L 和 2R 的网格 DOV 精度相对其他强波束的精度要低。ICESat-2 卫星整体以及 6 条强波束的卯酉分量标准偏差约为子午分量的 2 倍。

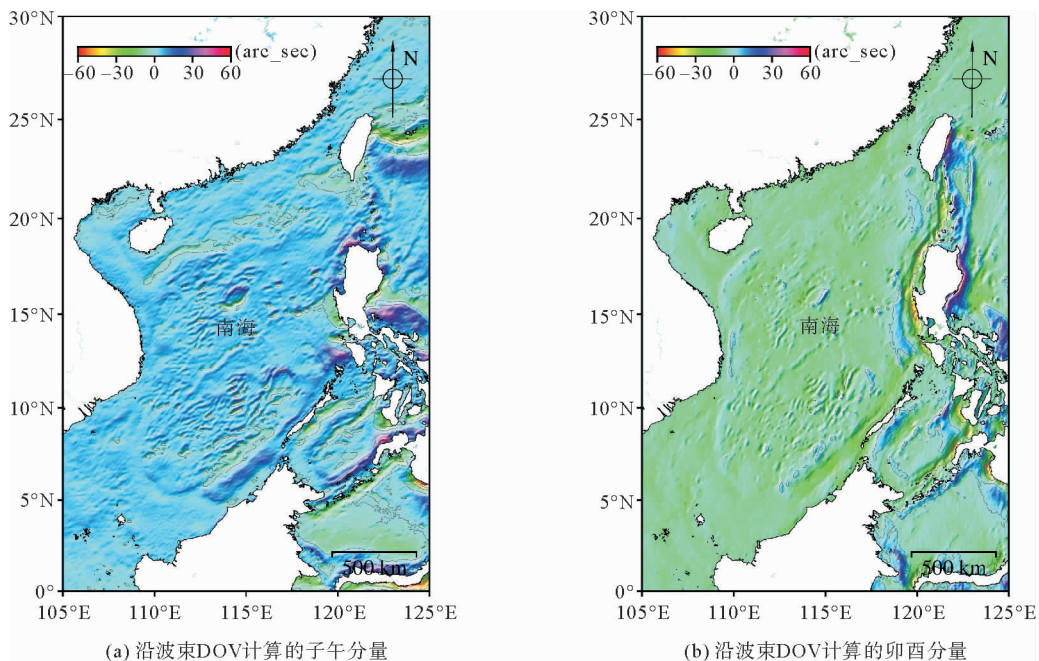


图 6 沿轨 DOV 计算的南海网格 DOV

Fig. 6 Gridded DOV calculated by the along-track DOVs in the South China Sea

表 5 沿轨 DOV 计算的网格 DOV 与 XGM2019e_2159_DOV 模型差值统计表

Table 5 The difference between the gridded DOV calculated by along-track DOV sand XGM2019e_2159-DOV model (")

波束	方向	最大值	最小值	平均值	标准偏差
1L_XGM2019	子午	14.36	-13.49	-0.01	0.98
	卯酉	27.43	-28.97	0.28	1.97
2L_XGM2019	子午	15.08	-20.60	-0.01	1.04
	卯酉	34.19	-32.35	0.26	2.01
3L_XGM2019	子午	12.94	-10.26	-0.01	0.95
	卯酉	27.01	-27.05	0.25	1.92
1R_XGM2019	子午	11.51	-16.27	-0.01	0.95
	卯酉	26.15	-28.42	0.24	2.00
2R_XGM2019	子午	14.55	-16.50	-0.01	1.08
	卯酉	28.31	-28.80	0.31	2.03
3R_XGM2019	子午	12.97	-13.37	-0.01	0.93
	卯酉	25.58	-24.34	0.27	1.98
ICESat-2_XGM2019	子午	13.44	-13.24	-0.08	0.90
	卯酉	25.24	-27.38	0.18	1.91

3.3 跨轨垂线偏差

计算跨轨 DOV 需要选取 2 条波束时间最接近的 2 个观测点,将选取的 2 个相邻观测点的海面高和方位角代入式(2),计算跨轨 DOV。采用 XGM2019e_2159-DOV 模型验证跨轨 DOV 的计算结果,见表 6。由表 6 可知,1L~3L 和 1R~3R 的垂线偏差精度比其他跨轨组合要高。原因是:①跨轨 DOV 精度与计算波束间的距离有关,1L~2L、2L~3L、1R~2R 与 2R~3R 的波束间距离为 3.5 km,跨轨方向观测点的球面距离控制在 3.5~7.0 km;而 1L~3L 和 1R~3R 的波束间距离为 6.5 km,跨轨方向观测点的球面距离控制在 6.5~9.0 km;②单脉冲被切割过程中切割位置不均造成中间强波束数据所在位置与其他两波束相比产生微小偏移,中间强波束与左强波束以及右强波束相邻数据间匹配程度较差。跨轨垂线偏差与沿轨垂线偏差解算精度近似一致,说明 ICESat-2 在跨轨方向计算的垂线偏差数据质量稳定可靠。

表 6 ICESat-2 跨轨 DOV 与 XGM2019e_2159-DOV 模型差值统计表

Table 6 The difference between ICESat-2 cross-track DOV and XGM2019e_2159-DOV model

波束组	数量/个	最大值/(")	最小值/(")	平均值/(")	STD/(")
1L-2L_XGM2019	232 813	5.48	-5.42	0.03	1.76
1L-3L_XGM2019	273 674	4.63	-4.35	0.14	1.38
2L-3L_XGM2019	237 206	4.81	-4.55	0.13	1.47
1R-2R_XGM2019	218 674	5.25	-5.60	-0.18	1.99
1R-3R_XGM2019	255 793	4.59	-5.22	-0.31	1.57
2R-3R_XGM2019	218 674	5.25	-5.60	-0.18	1.78
ICESat-2_XGM2019	1 500 917	4.01	-4.20	-0.01	1.35

基于跨轨 DOV 计算的 1'×1'规则网格 DOV,如图 7 所示。采用 XGM2019e_2159-DOV 模型进行精度验证,结果见表 7。由表 7 可知,跨轨 DOV 计算的网格 DOV 的卯酉分量精度高于子午分量,含有中间强波

束的波束组精度较差。与文献[17]计算的跨轨 DOV 相比,采用本研究数据筛选方法解算的子午分量和卯酉分量精度明显提高。由此可见,相邻海面高数据的方位角大小以及空间分布对网格 DOV 两分量的精度具有显著影响。另外,由表 6 和表 7 可知,网格 DOV 和海面高数据的精度还与数据密度有关,中间强波束的观测点密度低且精度较差,造成包含中间强波束的跨轨组合解算的网格 DOV 精度也相对较低。因此,ICESat-2 跨轨垂线偏差的计算可以提高卯酉分量的精度,但与沿轨 DOV 相比,其子午分量的精度降低。

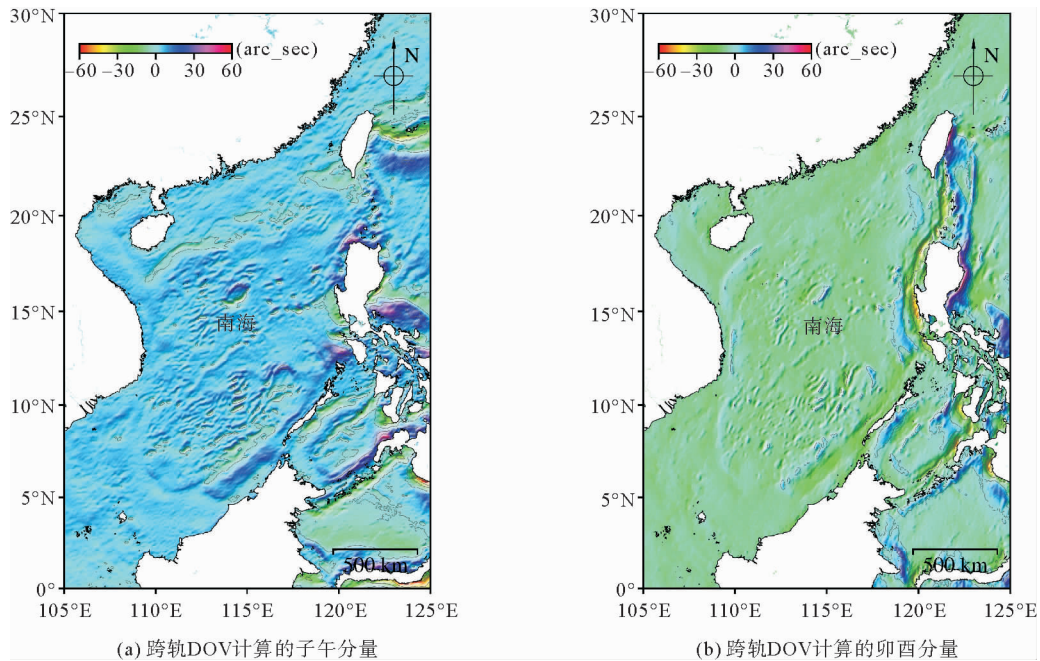


图 7 跨轨 DOV 计算的南海网格垂线偏差

Fig. 7 Gridded DOV calculated by the cross-track DOVs in the SCS

表 7 跨轨 DOV 计算的网格 DOV 与 XGM2019e_2159-DOV 模型差值统计表

Table 7 The difference between the gridded DOV calculated by cross-track DOVs and XGM2019e_2159-DOV model (")

波束组	方向	最大值	最小值	平均值	STD
1L-2L_XGM2019	子午	41.93	-40.74	-0.29	3.17
	卯酉	33.22	-37.33	-0.11	2.10
1L-3L_XGM2019	子午	41.93	-40.74	-0.19	2.67
	卯酉	28.24	-25.53	0.06	1.66
2L-3L_XGM2019	子午	41.71	-46.30	-0.28	3.06
	卯酉	26.83	-28.85	-0.17	1.95
1R-2R_XGM2019	子午	42.76	-44.95	-0.23	3.30
	卯酉	24.41	-28.74	0.11	2.12
1R-3R_XGM2019	子午	44.49	-44.37	-0.21	2.91
	卯酉	19.03	-18.77	0.08	1.73
2R-3R_XGM2019	子午	45.55	-38.05	-0.29	3.17
	卯酉	29.62	-32.95	0.19	1.98
ICESat-2_XGM2019	子午	44.72	-46.32	-0.21	2.63
	卯酉	27.92	-22.30	0.18	1.66

4 结论与展望

本研究计算了沿轨 DOV, 结合 ICESat-2 跨轨方向的海面高数据, 通过最小二乘配置法计算南海网格垂线偏差, 并用 XGM2019e_2159-DOV 模型进行精度验证。实验结果表明:

1) ICESat-2 海面高数据产品 ATL12 与 Jason-3 海面高数据精度均为厘米级, 说明激光测高卫星 ICESat-2 的海面高数据可靠。

2) 沿轨方向中间强波束垂线偏差精度低于其他 2 个强波束。沿轨 DOV 计算的南海网格 DOV 的卯酉分量标准偏差约为子午分量的 2 倍。跨轨方向的 6 组强波束 DOV 精度相近, 跨轨 DOV 计算的卯酉分量精度也高于子午分量。说明 ICESat-2 卫星的多波束同步观测模式不仅可以解算沿轨垂线偏差, 还可以根据波束之间同步观测值计算精度可靠的跨轨垂线偏差。因此, 与传统一维测量相比, ICESat-2 作为新型激光测高卫星的多波束观测有效提高了采样间隔, 使垂线偏差的计算不再局限于单一的沿轨道方向。

ICESat-2 卫星利用多波束同步观测模式可计算跨轨垂线偏差, 改善了子午分量和卯酉分量精度差异大的问题, 但如何融合激光测高卫星 ICESat-2 和雷达测高卫星的海面高数据提高垂线偏差精度, 仍为有待攻克的难题。此外, 二维海面高数据的垂线偏差解算技术刚起步, SWOT 任务即将提供网格海面高数据, 采用 SWOT 数据确定高精度和高分辨率的垂线偏差也是一项重要挑战。随着卫星测高技术的不断发展, 联合多源卫星的海面高数据有望反演出高精度和高空间分辨率的网格垂线偏差模型。

参考文献:

- [1] 郭金运, 金鑫, 边少锋, 等. 垂线偏差测量的固体潮和海潮改正[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1215-1224.
GUO Jinyun, JIN Xin, BIAN Shaofeng, et al. Corrections of solid earth tide and ocean tide for measurement of deflection of the vertical[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1215-1224.
- [2] 赵俐红, 庞贝贝, 凌子龙, 等. 基于改进的 FA2BOUG 法研究北极美亚海盆区域的布格重力异常特征[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(6): 1-9.
ZHAO Lihong, PANG Beibei, LING Zilong, et al. Calculation of Bouguer gravity anomaly in the Arctic Amerasia Basin based on improved FA2BOUG method[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2020, 39(6): 1-9.
- [3] 李杨, 郭金运, 孙玉, 等. 联合时变重力数据与测高数据反演全球海平面变化及其分量贡献[J]. 测绘学报, 2022, 51(8): 1768-1778.
LI Yang, GUO Jinyun, SUN Yu, et al. Inversion of global sea level change and its component contributions by combining time-varying gravity data and altimetry data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(8): 1768-1778.
- [4] 孙中苗, 管斌, 翟振和, 等. 海洋卫星测高及其反演全球海洋重力场和海底地形模型研究进展[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 923-934.
SUN Zhongmiao, GUAN Bin, ZHAI Zhenhe, et al. Research progress of ocean satellite altimetry and its recovery of global marine gravity field and seafloor topography model[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(6): 923-934.
- [5] 王伟, 章传银, 党亚民. 多源卫星重力数据融合研究进展[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2013, 32(6): 57-60.
WANG Wei, ZHANG Chuanyin, DANG Yamin. Study progress of multi-source satellite gravity data combination[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2013, 32(6): 57-60.
- [6] 郭金运, 魏志杰, 祝程程, 等. 基于重力异常迭代延拓的南海海底地形反演[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(4): 1-10.
GUO Jinyun, WEI Zhijie, ZHU Chengcheng, et al. Bathymetry inversion of South China Sea based on iterative continuation of gravity anomalies[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2021, 40(4): 1-10.
- [7] LIU Q K, XU K, JIANG M F. A new DOV gridding method and its application in marine gravity recovery[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 19: 1-5.
- [8] 王虎彪, 王勇, 柴华, 等. 中国西太平洋海域 $1' \times 1'$ 垂线偏差模型及精度评估[J]. 测绘学报, 2017, 46(9): 1073-1079.
WANG Hubiao, WANG Yong, CHAI Hua, et al. $1' \times 1'$ vertical deflection and its precision evaluation on China West Pacific

- Ocean region[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(9): 1073-1079.
- [9] JI H, GUO J Y, ZHU C C, et al. On deflections of vertical determined from HY-2A/GM altimetry data in the Bay of Bengal [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 12048-12060.
- [10] JI H, LIU X, ZHU C C, et al. On performance of CryoSat-2 altimeter data in deriving marine gravity over the Bay of Bengal[J/OL]. *Marine Geophysical Research*, 2021, 42. DOI:10. 1109/TGRS. 2017. 2786659.
- [11] MAGRUDER L A, BRUNT K M. Performance analysis of airborne photon-counting lidar data in preparation for the ICESat-2 mission[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(5): 2911-2918.
- [12] MARKUS T, NEUMANN T, MARTINO A, et al. The ice, cloud, and land elevation satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 260-273.
- [13] 郑迎辉, 张艳, 王涛, 等. 基于 ICESat-2 数据的高程控制点提取和精度验证[J]. *地球信息科学学报*, 2022, 24(7): 1234-1244.
- ZHENG Yinghui, ZHANG Yan, WANG Tao, et al. Elevation control points and accuracy validation based on ICESat-2 data [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2022, 24(7): 1234-1244.
- [14] TRAN N, VANDEMARK D, ZARON E D, et al. Assessing the effects of sea-state related errors on the precision of high-rate Jason-3 altimeter sea level data[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68: 963-977.
- [15] MORITZ H. Least-squares collocation[J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1978, 16(3): 421-430.
- [16] 魏巧云. 交叉点位置确定方法研究及相关数据处理[D]. 开封: 河南大学, 2017.
- WEI Qiaoyun. Research on crossover points location determination method and related data processing[D]. Kaifeng: Henan University, 2017.
- [17] 车德福, 李航, 张胜军, 等. 同步激光测高数据的垂线偏差解算与分析[J]. *测绘科学*, 2021, 46(11): 24-31.
- CHE Defu, LI Hang, ZHANG Shengjun, et al. Calculation and analysis of vertical deflection of simultaneous laser altimetry data[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(11): 24-31.

(责任编辑:高丽华)