多源卫星高度计新融合产品的研发与评估

刘磊^{1,2,3}, 蒋星亮^{2,4}, 费建芳^{1*}, Zhijin Li²

1. 国防科技大学气象海洋学院, 南京 211101;

2. Joint Institute for Regional Earth System Science and Engineering, University of California, Los Angeles, CA 90095-7228, USA;

3. 复旦大学大气与海洋科学系, 大气科学研究院, 上海 200438;

4. 南京信息工程大学海洋数值模拟与观测实验室, 南京 210044

* 联系人, E-mail: feijf@sina.com

2020-01-29 收稿, 2020-03-31 修回, 2020-04-01 接受, 2020-04-02 网络版发表

国家自然科学基金(4177050135, 41705042)资助

摘要 卫星高度计在海洋环流观测、海平面变化分析和海洋环境预报等多个研究和业务领域得到广泛应用. 当前在轨运行的高度计卫星已达5颗(Sentinel-3A、Jason-3、Cryosat-2、Sara/AltiKa以及HY-2A), 观测精度不断提高, 但卫星高度计融合产品的有效分辨率(可分辨海面涡旋的最小尺度)仍需进一步提升. 本研究以变分原理为基础, 改进背景场、背景误差协方差矩阵以及观测误差, 建立一种新的多源卫星高度计资料融合方法. 以南海及其附近海域为目标区域, 在格距为 0.08° 的规则网格上, 融合所有在轨运行的5颗卫星高度计的沿轨数据, 得到逐日融合产品. 评估分析表明: 新方法得到的融合产品的有效分辨率达到125 km左右, 与国际上广泛应用的AVISO产品相比(格距 0.25° , 有效分辨率240 km), 有效分辨率提高近一倍, 融合产品的精度进一步提高, 可用于描述更小尺度的海洋环流结构.

关键词 多源卫星高度计, 融合产品, 有效分辨率, 变分方法, 最优估计

卫星高度计在运行中获取沿轨星下点的海面高度(sea surface height, SSH), 在海洋环境观测研究和业务预报中具有重要的应用价值^[1]. 然而由于单颗卫星大于100 km的轨道间隔, 以及10~30 d不等的运行周期, 极大地限制了卫星高度计沿轨数据在海洋中尺度涡及中尺度环流研究中的直接应用^[2~4]. 随着高度计卫星更新换代, 其运行数量始终维持在3~4颗以上. 充分利用多颗卫星沿轨数据, 在规则网格上融合产生二维数据产品, 是克服沿轨数据局限性的有效方法. 如法国建立的多源卫星高度计资料融合产品AVISO(archiving, validation, and interpretation of satellite oceanographic data), 在海洋相关研究中获得广泛应用^[5,6].

有效分辨率是融合产品质量的重要指标, 即可分辨海面涡旋的最小尺度, 从谱分析角度定义为融合数

据信号与真值信号的能量谱密度比值大于0.5时的最小空间尺度^[7]. 融合产品的有效分辨率不仅依赖于高度计资料的分布密度, 还与融合算法密切相关. 当前, 在轨运行的高度计卫星多达5颗, 包括Sentinel-3A、Jason-3、Cryosat-2、Sara/AltiKa以及我国的海洋2A(HY-2A)号卫星^[8,9]. 根据23 d卫星轨迹分布图(图1(a), (b)), 南海及其附近海域未被卫星沿轨资料覆盖的最大空白区域间距为45~80 km之间, 而AVISO在该海域的有效分辨率仅为240 km^[6,10~12], 未达到最大有效分辨率. 融合产品的有效分辨率能否进一步提高, 是当前研究的重点.

本研究首先介绍融合方法的数学性质, 揭示有效分辨率与融合方法的依赖关系. 在此基础上, 提出一个提高有效分辨率的新融合方法, 产生南海及其附近海域(图1(a))绝对动力高度(absolute dynamic topogra-

引用格式: 刘磊, 蒋星亮, 费建芳, 等. 多源卫星高度计新融合产品的研发与评估. 科学通报, 2020, 65: 1888–1897

Liu L, Jiang X L, Fei J F, et al. Development and evaluation of a new merged sea surface height product from multi-satellite altimeters (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 1888–1897, doi: 10.1360/TB-2020-0197

图 1 多源卫星23 d轨迹覆盖及背景误差协方差相关系数。(a) 产生融合产品的区域, 南海及其附近海域, 以及2018年2月17日前后11 d高度计卫星获取的沿轨绝对动力高度(absolute dynamic height, ADT, 单位: m)合成分布图; (b) 未被卫星轨道覆盖的空白区域内最大数据间距(单位: km); (c) 背景误差相关系数。背景误差以相应的融合场与沿轨滤波资料相减得到。红实线为2DVAR计算得到的相关系数分布; 红虚线为用最小二乘法拟合高斯函数分布(相关系数尺度为50 km); 蓝实线为AVISO融合产品25年气候平均背景场计算得到的相关系数分布

Figure 1 Coverage of multi-satellite orbits for 23 d and background error correlation coefficients. (a) Distribution of absolute dynamic topography (ADT, unit in m) along the tracks acquired by altimeter satellites 11 d before and after February 17th, 2018; (b) maximum data gap uncovered by satellite orbits (unit in km); (c) background error correlation coefficients, calculated with the differences between mapped data and along-track observation filtered data. Red solid line denotes the distribution of background error correlation coefficient of 2DVAR. Red dashed line denotes the Gaussian distribution by fitting 2DVAR with its correlation coefficient scale of 50 km. Blue solid line denotes the distribution of background error correlation coefficient of AVISO calculated from 25 years mean background

phy, ADT)的逐日融合产品, 并对融合产品的质量和有效分辨率进行评估。

1 资料融合方法

针对卫星高度计, 本研究以二维变分原理(2DVAR)为基础, 在背景场选择、背景误差协方差矩阵构造以及观测误差分析上提出新的思路, 发展一种新的多源卫星高度计资料融合方法。

1.1 二维变分原理

二维变分方法采用数值方法求解代价函数的最小化问题:

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x^b)^T B^{-1}(x - x^b) + \frac{1}{2}(y^o - Hx)^T R^{-1}(y^o - Hx), \quad (1)$$

其中, x 为控制向量, 设定为所有规则网格点上的ADT值。 x^b 为背景场, B 为背景误差协方差矩阵。 y^o 为所有观测点组成的向量, R 为观测误差协方差矩阵。 H 为观测算子, 将背景场数值映射到观测点。

式(1)的解析解须满足 $dJ(x)/dx=0$, 通过矩阵运算, 得到最小化解的表达式:

$$x^a = x^b + BH^T(HBH^T + R)^{-1}(y^o - Hx^b), \quad (2)$$

上式可直接计算 x^a , 该求解方法称为最优插值(OI)方法。在海洋资料分析中, OI方法通常采用Bretherton等人^[13]的公式, 背景误差取各向均匀同性, 并进行逐点融合^[14,15], 是变分方法及式(2)OI解的特殊情况^[16], AVISO即采用Bretherton等人^[13]的公式进行资料融合。

本研究基于二维变分原理, 通过数值方法最小化式(1), 主要有以下计算优点: (1) 通过矩阵变形避免了背景误差协方差矩阵求逆, 计算效率高, 适合求解高分

分辨率条件下, 格点数巨大的问题; (2) 背景误差协方差矩阵和观测误差协方差矩阵的处理手段更灵活, 同时方便引进动力约束; (3) 依据观测算子 H , 易于将不同性质的观测资料融合.

1.2 背景场和背景误差协方差阵

为了方便背景误差的估计和构造, 采用如下分解:

$$B = \Sigma C \Sigma, \quad (3)$$

其中 Σ 是对角矩阵, 对角元为每个格点上的背景误差均方根. C 为相关系数阵, 由背景场格点之间的误差相关系数组成. 空间相关系数的性质, 主要由相关系数尺度决定, 而相关系数尺度有不同的定义和估计方法. 本研究以高斯函数表示相关系数: $e^{-r^2/2L^2}$, r 为格点之间距离, L 为相关系数尺度, 取相关系数由1下降到 $e^{-1/2}$ (约为0.6) 的距离.

背景误差相关系数在资料融合中具有关键作用, 决定了如何将观测信息从观测点插值到观测空白区. 背景误差相关系数尺度决定融合产品的有效分辨率(Li等人^[17,18]): 当背景误差相关系数尺度小, 融合产品的有

效分辨率高, 相反, 背景误差相关系数尺度大, 融合产品有效分辨率低. 无论有多少颗高度计卫星, 融合产品的有效分辨率都不高于两倍相关系数尺度^[19]. 上述理论是本研究发展融合产品, 有效分辨率相对AVISO进一步提高的理论基础.

在融合方法中, 选定背景场后, 构造与该背景场对应的背景误差协方差矩阵: AVISO选用25年气候平均的卫星高度计资料作为背景场, 因此, 年际变化、季节变化以及大尺度涡等信号包含在距平场中作为背景误差. AVISO利用高度计沿轨距平资料计算背景误差相关系数时, 空间上的大尺度信号导致南海及附近区域(图1(a))的背景误差相关系数尺度为120 km^[6]. 由于融合产品的有效分辨率不高于两倍的相关系数尺度, AVISO融合产品的有效分辨率不高于240 km. 经计算表明, AVSIO融合产品的有效分辨率大约为240 km(图2(c)、(d)), 在后文中进行了详细分析.

本研究建立的新融合方法选用前一天的融合产品结果作为背景场, 计算背景误差相关系数, 以高斯函数构建背景误差协方差矩阵, 相关系数从1下降到 $e^{-1/2}$ (约为0.6) 的距离为背景误差相关系数尺度, 通过最小二乘

图2 3种资料的平均沿轨能量谱密度和两种融合产品与沿轨资料的平均沿轨能量谱密度比值. AVISO(蓝)和2DVAR(红)融合产品被插值到J3(a)和S3A(b)轨道(黑)后的平均沿轨能量谱密度对比. AVISO(蓝)、2DVAR(红)与J3(c)以及S3A(d)平均沿轨能量谱密度的比值. 由于卫星沿轨滤波数据滤除了65 km以下波动, 没有画出小于65 km尺度部分

Figure 2 Average energy spectral density of AVISO (blue), 2DVAR (red) and along-track observation filtered data on J3 (a) and S3A (b) satellite tracks. The ratio of average energy spectral density of AVISO and 2DVAR to J3 (c) satellites along-track observation filtered data and S3A (d) satellites along-track observation filtered data respectively. The scales shorter than 65 km are not listed for the filtering

法进行高斯分布拟合,得到的背景误差相关系数尺度下降到约50 km(图1(c)),远小于AVISO.基于上述分析,新的融合方法中背景误差相关系数尺度的取值略大于统计结果,采用55 km.

1.3 多时次观测及观测误差

高度计卫星运行周期为10~30 d,为了获取足够密集的资料产生逐日融合产品,必须采用多天的观测资料. AVISO按背景误差的时间相关系数尺度确定资料时长. 因为高度计资料的时间相关系数尺度最长达到35 d, AVISO采用当天及前后35 d, 总共71 d的资料^[14,15]. 本研究提出依据观测资料密度来确定时长. 基于图1(b)的分析结果,融合产品当天及前后11 d, 总共23 d的资料可满足背景误差相关系数尺度的要求.

融合长时间的观测资料时,必须考虑观测时次不同造成的误差,本研究称为时间采样误差(简称为采样误差). 为考虑该误差, AVISO在背景误差协方差中引入了时间维,观测资料的权重随相距融合产品时间点的增加而减小^[20]. AVISO采用的时间相关系数方法对融合产品施加了强时间平滑,且背景误差中时间相关系数的引进也仅为一种经验方法,没有统计理论基础,同最优估计理论中的马尔可夫过程的基本假设相矛盾^[21].

为提高有效分辨率,本研究发展了不同于AVISO的新方法:采样误差由观测时间与融合时间不同而造成. 按性质分析,为观测误差的一部分. 因此,观测误差协方差矩阵由两部分组成:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}^m + \mathbf{R}^s, \quad (4)$$

其中, $\mathbf{R}^m$ 和 $\mathbf{R}^s$ 分别为测量和采样误差协方差矩阵. 测量误差为已知,在高度计定标过程中给定,本研究使用的测量误差在表1中列出.

利用Jason-3(J3)沿轨资料估计采样误差. J3为固定轨道,轨道周期为10 d,因此,可用J3沿轨资料估计10和20 d间隔的时间演变标准差,即采样误差均方根误

差,分别为4和6 cm. 通过曲线拟合,插值得到其他时次的采样误差. 采样误差存在空间相关,但在观测误差协方差矩阵中引进空间相关目前仍无法实现,因此在本研究中未直接考虑,仅经验性地将均方根误差增加20%.

2 高度计沿轨资料和融合产品产生

选取南海及其附近海域为研究区域: 100°~130°E, 0°~26°N(图1(a)). 为了提高有效分辨率,背景网格采用0.08°的格距(AVISO融合产品的格距为0.25°). 融合时段选取2018年1~6月的半年时间. 在该时段内,有Cryo-sat-2(C2)、Sentinel 3A(S3A)、J3、Saral/AltiKa(SA)以及HY-2A共5颗卫星在轨运行. 对上述所有5颗卫星的高度计沿轨ADT数据进行融合,具体的卫星高度计相关信息参见表1. 1.2节指出,背景误差中的相关系数起滤波作用,而滤波的程度取决于相关系数尺度. 因此,借助融合方法本身的滤波性质,直接采用未过滤的沿轨ADT资料进行融合.

3 融合产品评估

AVISO提供准实时和再分析两种融合产品,本研究以更准确的再分析融合产品作为对比(以下简称AVISO). 新方法产生的逐日融合产品,以下简称2DVAR.

由于缺少高密度的独立数据对融合产品有效分辨率进行评估,采用滤波后的J3和S3A沿轨资料(以下简称沿轨资料)作为观测真值^[22],确定有效分辨率及误差. 然后利用独立的AMSR2卫星观测的海表温度(sea surface temperature, SST)^[23]和NOAA提供的南海洋面漂流浮标资料^[24],考查融合产品的合理性.

3.1 有效分辨率评估

本研究利用沿轨资料计算能量谱密度,同时将AVISO和2DVAR两套融合产品插值到沿轨资料点,进

表1 南海及附近海域高度计卫星相关信息

Table 1 Information about altimeter satellites over South China Sea

卫星高度计	周期(d)	纬度范围(°)	周期 轨道数	赤道上轨道间 距离(km)	测量误差 (cm)	是否太阳同步 卫星	双频 高度计	资料起始日期
J3	10	±66	254	~315	2.9	否	是	2016.02.17
C2	29	±88	840	~98	2.5	否	否	2011.01.28
SA	35	±81.5	1002	~80	2.1	是	否	2016.07.04
HY-2A	14	±81	386	~210	3.1	是	是	2016.03.15
S3A	27	±81.5	770	~100	2.4	是	是	2016.06.15

行同样的谱计算. 得到两套融合产品与沿轨资料能量谱密度的比值为1/2的尺度, 即为融合产品的有效分辨率. 由图2可见, 能量谱密度大小依次为沿轨资料、2DVAR和AVISO. 2DVAR和AVISO在融合过程中对数据进行了平滑, 但AVISO的平滑更显著. 2DVAR的平均能量谱密度在90~300 km波长之间显著大于AVISO, 表明2DVAR融合产品更多地保留了该尺度区间的信号, 从而增加了资料的有效分辨率. 在大于300 km的尺度上, 沿轨资料、2DVAR和AVISO的谱密度接近, 说明2DVAR和AVISO对大于300 km尺度以上的信号平滑较小. 在小于90 km尺度上, 3种资料的谱能量较小, 该尺度内的信号在很大程度上被滤除.

图2(c)为能量谱密度比值, 与J3沿轨资料对比, 2DVAR的有效分辨率约为130 km, 而AVISO为250 km. 与S3A沿轨资料对比, 2DVAR的有效分辨率为120 km, 而AVISO为230 km. 与S3A沿轨资料对比的计算结果略高于J3沿轨资料的计算结果, 归因于S3A沿轨资料具有

更高的精度(表1). 对J3和S3A沿轨资料的计算结果进行平均, 2DVAR的有效分辨率达到了125 km.

3.2 融合产品误差评估

为进一步分析融合产品误差, 首先将AVISO和2DVAR融合产品分别插值到J3和S3A卫星的周期轨道, 然后进行对比分析. 在2018年3月8日沿J3和S3A卫星轨道的ADT对比中(图S1), 2DVAR相对AVISO在总体上更接近卫星沿轨数据, 特别是较小尺度结构. 但在少数轨道点上, AVISO融合产品比2DVAR更接近沿轨数据.

图3为6个月的融合产品与沿轨资料的ADT散点对比分布图. 与上述分析一致, 无论J3或S3A沿轨资料, 2DVAR比AVISO更接近于卫星沿轨数据. 在J3卫星轨道上, 2DVAR的均方根误差平均值为2.9 cm, AVISO为3.1 cm. 在S3A卫星轨道上, 2DVAR的均方根误差平均值为3.0 cm, 而AVISO为3.2 cm.

图4进一步考查融合产品均方根误差的区域分布.

图3 融合产品与沿轨资料的ADT散点对比分布(单位: m). 沿J3轨道的AVISO(a)和2DVAR(b), 沿S3A轨道的AVISO(c)和2DVAR(d). 红色实线为散点拟合线, R 为相关系数, RMSD为均方根误差平均值(单位: cm)

Figure 3 Scatter distributions of ADT (units in m) of AVISO (a) and 2DVAR (b) compared with J3 satellite along-track observation filtered data respectively. Scatter distributions of ADT of AVISO (c) and 2DVAR (d) compared with S3A satellite along-track observation filtered data respectively. The red solid line is the scatter fitting line. R is the similarity, and RMSD is the root mean square error (units in cm)

图 4 融合产品与沿轨资料之间的ADT均方根误差(单位: cm)AVISO(a)、2DVAR(b)与J3对比及沿J3轨道的融合产品误差关系指数(c); (d)、(e)和(f)对应(a)、(b)和(c), 但与S3A沿轨道资料对比

Figure 4 Root mean square error of ADT (units in cm) between AVISO (a), 2DVAR (b) and J3 satellite along-track observation filtered data. (c) Error relation index of merged product along J3 satellite track. (d), (e) and (f) correspond to (a), (b) and (c) respectively but S3A satellite along-track observation filtered data instead

图 5 2018年2月19日由AVISO(a)和2DVAR(b)融合产品的ADT计算地转流(矢量箭头)与卫星海面温度(填色)对比, 海面温度为AMSR2卫星资料
Figure 5 Distribution of sea surface geostrophic current (vector arrow) from the ADT of AVISO (a) and 2DVAR (b) on February 19th, 2018. Sea surface temperatures (SSTs, shaded) are from AMSR2 satellite

均方根误差具有明显的区域分布特征, 2DVAR和AVISO在相同区域存在较大的误差, 达到3~5 cm, 而在南海区域内部, 小于2 cm. 均方根误差的区域变化与ADT的自身变化直接关联, 表现为ADT自身变化显著的区域(即具有较大标准差的区域, 图略), 为均方根误差较大的区域. 融合产品的均方根误差相对于标准差, 不超过20%.

图4中2DVAR的均方根误差小于AVISO. 为了更直观地表示2DVAR和AVISO均方根误差差异, 定义一个关系指数:

$$P = 1 - \sigma_{2DVAR}^2 / \sigma_{AVISO}^2, \quad (5)$$

其中, σ_{2DVAR} 和 σ_{AVISO} 为2DVAR和AVISO均方根误差. P 为2DVAR产品相对AVISO的均方根误差减少率, 当 $P > 0$, 2DVAR的均方根误差小于AVISO. 从图4(c)、(f) 可以看到, 除了一些零散的区域, 2DVAR的均方根误差总体上小于AVISO, 误差减小超过50%.

3.3 独立资料对比

卫星SST资料提供完整的二维图像, 虽然SST与

图6 漂流浮标对比图. (a) 2018年1月1日~6月10日南海海域漂流浮标轨迹; AVISO(b)和2DVAR(c)与漂流浮标地转流速(GDP)散点分布、拟合曲线及均方根误差(RMSE); 2018年1月20日AVISO(d)和2DVAR(e)的融合产品场与浮标轨迹(蓝色为当日轨迹, 红色为前一天和后一天轨迹, 箭头为浮标移动方向)的对比

Figure 6 Comparisons with drifter data. (a) Drifter tracks in South China Sea during January 1 to June 10, 2018. Scatter distribution of the geostrophic current speed of AVISO (b) and 2DVAR (c) corresponding to drifter data and the scatter fitting line (red) and the root mean square error (RMSE). Distribution of ADT of AVISO (d) and 2DVAR (e) with the track of drifter ID-63250950. Blue is the current day and the red is one day before and after. Vector is the direction of movement of drifter

ADT不存在完全地对应关系,但SST的空间结构常常能显示ADT中的中尺度涡和其他中尺度环流的空间位置和结构。图5给出2018年2月19日由融合产品计算得到的地转流和AMSR2的SST分布。南海中部、南部以及菲律宾群岛东部区域, SST显示了多个海洋锋面及局地冷、暖中心结构, 2DVAR地转流与SST锋面和冷暖中心相匹配。而AVISO地转流场相对平滑,地转流结构没有很好地对应SST。

通过浮标位置及其他辅助数据计算海洋地转流速。由于漂流浮标稳定器位于15 m水深,因此该独立资料计算了15 m水深的地转流速,而融合产品得到的是海洋表面的地转流速。虽然存在一定偏差,但在缺少可靠独立资料的情况下,仍为一种有效的评估方法。图6给出了浮标历史位置,以及融合产品的地转流速与浮标地转流速的散点分布。由图可见, AVISO的地转流速相对浮标速度偏弱,而2DVAR在0.2~0.6 m/s的地转流速区间偏强。与此同时, 2DVAR的地转流速与浮标地转流速之间的均方根误差小于AVISO。受地转流驱动,浮标轨迹沿高度场等值线移动。图6(d)、(e)中给出了浮标轨迹与融合产品ADT的对比, 2DVAR的ADT与浮标轨迹方向相对AVISO更为一致。

4 结论与讨论

卫星高度计数据作为一种重要的海洋遥感资料,在海洋动力学的研究中发挥了重要作用^[25]。国际上投入了巨大的人力和物力,维持多颗高度计卫星同时在轨运行,以保持适当的资料密度。当前,在轨卫星已达5颗,为了综合运用卫星高度计资料,需要在规则网格上融合多源卫星沿轨数据,发展融合产品。在现有卫星数量不变的情况下,融合产品的有效分辨率能否进一步提高,是卫星高度计资料研究中广泛关注的问题。

本研究基于变分原理发展了新融合算法,从背景场、背景误差协方差矩阵以及观测误差等多方面突破现有理论,极大地提高了融合产品的有效分辨率。首先,选取前一天的融合场作为背景场,由该背景场计算得到的背景误差以中小尺度信号占主导,可显著减小背景误差相关系数尺度。其次,发展新的观测误差处理方法,引入采样误差概念,更有效地融合来自不同时次的观测,极大地减小时间平滑。最后,新方法利用融合算法本身具有的平滑作用,直接融合未经滤波的沿轨资料。本研究提出的背景场选取原则和观测误差处理方法具有一般性,可应用到其他高分辨率观测资料的融合方法中,对提高卫星遥感资料的应用价值具有重要意义。

致谢 感谢国防科技大学气象海洋学院王辉赞副研究员对本研究提出的修改建议。

参考文献

- 1 Fu W, Zhu J. Effects of sea level data assimilation by ensemble optimal interpolation and 3D variational data assimilation on the simulation of variability in a tropical pacific model. *J Atmos Ocean Technol*, 2011, 28: 1624–1640
- 2 Fu L L, Christensen E J, Yamarone Jr C A, et al. TOPEX/POSEIDON mission overview. *J Geophys Res*, 1994, 99: 24369–24381
- 3 Fu L, Chelton D, Le Traon P, et al. Eddy dynamics from satellite altimetry. *Oceanography*, 2010, 23: 14–22, 24–25
- 4 Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Prog Oceanogr*, 2011, 91: 167–216
- 5 Ducet N, Le Traon P Y, Reverdin G. Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2. *J Geophys Res*, 2000, 105: 19477–19498
- 6 Pujol M I, Faugère Y, Taburet G, et al. DUACS DT2014: The new multi-mission altimeter data set reprocessed over 20 years. *Ocean Sci*, 2016, 12: 1067–1090
- 7 Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M, et al. Global observations of large oceanic eddies. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L15606
- 8 Zhao G, Zhou X H, Wu B. Precise orbit determination of Haiyang-2 using satellite laser ranging. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 589–597
- 9 Lin M S, He X Q, Jia Y J, et al. Advances in marine satellite remote sensing technology in China (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 2019, 41: 99–112 [林明森, 何贤强, 贾永君, 等. 中国海洋卫星遥感技术进展. 海洋学报, 2019, 41: 99–112]
- 10 Dibarboure G, Pujol M I, Briol F, et al. Jason-2 in DUACS: Updated system description, first tandem results and impact on processing and products. *Mar Geod*, 2011, 34: 214–241
- 11 Taburet G, Sanchez-Roman A, Ballarotta M, et al. DUACS DT2018: 25 years of reprocessed sea level altimetry products. *Ocean Sci*, 2019, 15: 1207–1224
- 12 Ballarotta M, Ubelmann C, Pujol M I, et al. On the resolutions of ocean altimetry maps. *Ocean Sci*, 2019, 15: 1091–1109
- 13 Bretherton F, Davis R, Fandry C. A technique for objective analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE-73. *Deep-Sea Res*, 1976, 23: 559–582

- 14 Le Traon P Y, Nadal F, Ducet N. An improved mapping method of multisatellite altimeter data. *J Atmos Ocean Technol*, 1998, 15: 522–534
- 15 Le Traon P Y, Dibarboure G. Velocity mapping capabilities of present and future altimeter missions: The role of high-frequency signals. *J Atmos Ocean Technol*, 2002, 19: 2077–2087
- 16 Chao Y, Li Z, Farrara J D, et al. Blending sea surface temperatures from multiple satellites and *in situ* observations for coastal oceans. *J Atmos Ocean Technol*, 2009, 26: 1415–1426
- 17 Li Z, McWilliams J C, Ide K, et al. A multiscale variational data assimilation scheme: Formulation and illustration. *Mon Weather Rev*, 2015, 143: 3804–3822
- 18 Li Z, Cheng X, Gustafson Jr. W I, et al. Spectral characteristics of background error covariance and multiscale data assimilation. *Int J Numer Meth Fluids*, 2016, 82: 1035–1048
- 19 Li Z, Zuffada C, Lowe S, et al. Analysis of GNSS-R altimetry for mapping ocean mesoscale sea surface heights using high-resolution model simulations. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, 2016, 9: 4631–4642
- 20 Le Traon P Y, Faugère Y, Hernandez F, et al. Can we merge GEOSAT follow-on with TOPEX/Poseidon and ERS-2 for an improved description of the ocean circulation? *J Atmos Ocean Technol*, 2003, 20: 889–895
- 21 Li Z, Navon I M. Optimality of variational data assimilation and its relationship with the Kalman filter and smoother. *Q J R Meteorol Soc*, 2001, 127: 661–683
- 22 Peng D J, Wu B. Jason-1 Satellite centimeter-scale satellite-borne GPS for precise orbit determination (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2008, 53: 2569–2575 [彭冬菊, 吴斌. Jason-1卫星厘米级星载GPS精密定轨. 科学通报, 2008, 53: 2569–2575]
- 23 Imaoka K, Kachi M, Kasahara M, et al. Instrument performance and calibration of AMSR-E and AMSR2. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci*, 2010, 38: 13–16
- 24 Lumpkin R, Luca C. Global drifter program quality-controlled 6-hour interpolated data from ocean surface drifting buoys. NOAA National Centers for Environmental Information, 2019
- 25 Pan J Y, Yuan Y L, Zheng Q A. Observation of the low-frequency variability of the Kuroshio Current region by using Geosat altimeter data I. SSH anomaly and its comparison with tidal gauge sea level data (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 1997, 19: 41–50 [潘家玮, 袁业立, 郑全安. 用Geosat高度计数据观测黑潮流系的低频变化 I. 海面高度异常及与验潮站实测数据的比较. 海洋学报, 1997, 19: 41–50]

补充材料

图S1 2018年3月8日沿J3轨道和S3A轨道的ADT对比

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “多源卫星高度计新融合产品的研发与评估”

Development and evaluation of a new merged sea surface height product from multi-satellite altimeters

Lei Liu^{1,2,3}, Xingliang Jiang^{2,4}, Jianfang Fei^{1*} & Zhijin Li²

¹ College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China;

² Joint Institute for Regional Earth System Science and Engineering, University of California, Los Angeles, CA 90095-7228, USA;

³ Department of Atmosphere and Ocean Sciences & Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, China;

⁴ Oceanic Modeling and Observation Laboratory, Nanjing University of Information Technology, Nanjing 210044, China

* Corresponding author, E-mail: feijf@sina.com

Satellite altimetry data has been a backbone of global oceanography research since the early 1990s. Because a satellite altimeter measures sea surface height (SSH) at the nadir point, it produces a one-dimensional profile of SSH. Along the track, an altimeter provides SSH sampling at an interval of about 7 km. However, the distance between adjacent tracks is larger than 100 km, and satellites have repeat times of 10–30 d. These characteristics limit the usefulness of altimetry data from a single satellite for scientific analysis of the space-time structure of ocean circulation. During the past two decades, there have usually been three to four altimeters in orbit at any one time. Mapping along-track measurements from multiple altimeters onto a uniform grid has been a major research theme. A popular merged data product, known as AVISO, has been developed and extensively applied to a wide variety of ocean research.

One of key properties of a merged data product is its effective resolution. The effective resolution represents the minimum spatial size of an eddy or other mesoscale circulation that the data product can resolve. The AVISO data product has an effective resolution of 300 km in equatorial regions to 100 km in high latitudes. Nowadays, there are more than five satellite altimeters in orbit, including the Chinese HY-2A that was launched in 2011, and thus the density of the tracks has been much improved. However, the effective resolution of the AVISO data product has not increased accordingly.

Effective resolution of mapped data is closely related to the background error correlation coefficient scale in the mapping scheme. The effective resolution is no more than twice the correlation coefficient scale even when the amount of satellite altimeter is more than 5. As the background fields contains the correct large scale information, the meso-scale or small-scale information in the background error will play a dominant role and the background error correlation coefficient scale becomes even smaller. Therefore, The option of background determines the effective resolution of mapped data. The above theory is the basement of our new proposed mapping scheme, which effectively improved the effective resolution. Another key technique is how to deal with the observation errors: to reduce time-smoothing by introducing evolution errors in observation errors and effectively mapping multi-mission satellite altimeters from different times.

In this study, a new mapping system has been developed, aiming to maximize the effective resolution of the mapped data product. The formulation is based on a variational method and optimal estimation theory. The system has been applied to the South China Sea region. The product uses a regular grid with spacing of 0.08°, in comparison to 0.25° for AVISO. The product merged data from five satellites, Sentinel-3A, Jason-3, Cryosat-2, Saral/AltiKa and HY-2A. Systematic evaluations show that this new product has an effective resolution of 125 km, whereas the AVISO data product an effective resolution of 240 km for the same region. The accuracy is also significantly improved.

The new proposed mapping scheme is important in the application of satellite altimeters on the study of meso-scale ocean eddies. In addition, the option of background fields and the processing method of observation error are strictly general and can be used in other schemes of high-resolution data mapping.

multi-satellite altimeter, merged data product, effective resolution, variational method, optimal estimation

doi: [10.1360/TB-2020-0197](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0197)