

基于微波遥感技术海面盐度反演方法

牛原, 邱志伟, 常宇佳, 吴振宇, 潘春天

(江苏海洋大学 海洋技术与测绘学院, 江苏 连云港 222005)

摘要: 海面盐度 (sea surface salinity, SSS) 是研究海洋变化及其气候效应重要的物理量, 对海洋生态环境、海洋可持续发展至关重要。为了提高海面盐度反演精度, 本文通过对 SMAP 卫星 L 波段微波辐射计测量的亮温数据进行海面盐度反演研究, 考虑风、浪等影响海面粗糙度的环境因子对 Klein-Shift 模型 (简称 K-S 模型) 进行改进, 再将反演盐度与 Argo 盐度进行比对。结果显示改进 K-S 模型反演盐度与 Argo 盐度相关系数 $R = 0.99$, 呈显著相关, 且平均偏差 B_{IAS} 和均方根误差 R_{MSE} 分别为 0.16 和 0.17, 残差基本分布在 0.2 之内, 相比较于 K-S 模型, 反演精度提高了 0.5 左右。总的来看, 改进 K-S 模型反演盐度与 Argo 盐度之间偏差较小, 反演精度较好, 在空间分布上趋于一致, 且海面盐度空间变化上具有明显的纬度分布地理特征。

关键词: 海面盐度; 反演方法; 改进 K-S 模型

中图分类号: TP79 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2022)01-0067-09

DOI: 10.11759/hyhx20200713005

海面盐度 (sea surface salinity, SSS) 研究对于全球海-气变化、海洋生态环境及可持续发展研究具有重大意义^[1]。目前对于海面盐度的研究, 大多集中在遥感卫星观测、现场实测等方面。现场观测虽然精度高, 但是无法获取大范围的海面盐度数据, 且费时费力。微波遥感反演是获得大范围的海面盐度数据的有效手段。

国外开展海面盐度的研究工作较早。早在 1970 年, Hollinger^[2]就证明了海表亮温的观测与海面风速等因素有关。随后 Swift 等^[3]进行实验证明利用微波遥感技术进行海面盐度研究是切实可行的, 频率为 1.413 GHz 的 L 波段是微波遥感技术探测盐度的最佳波段。Blume 等^[4]利用 L 波段和 S 波段微波辐射计在临近大西洋海域对海面盐度进行实验, 在综合考虑到辐射和海面粗糙度等影响因素下, 海面盐度反演精度达到 1。Talone 等^[5]做了一系列实验, 证明了通过处理辅助数据能够对亮温和海面盐度反演精度有明显的提高; Fore 等^[6]基于 SMAP 数据提出了两种盐度反演方法: 一种只利用 L 波段辐射计, 另一种是利用雷达反演风场来联合反演, 并说明了风速对于盐度反演的影响很大。Olmedo 等^[7]基于非贝叶斯方法反演海面盐度, 提出了一种有效消除系统偏差的方法, 但是无法消除风速等辅助数据带来的随机偏差, 进而影响海面盐度反演的精度。国外开展

盐度遥感卫星项目也处于领先状态, 目前在轨运行的可以用于海面盐度研究的遥感卫星主要有欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 的土壤湿度和海面盐度卫星 (soil moisture and ocean salinity, SMOS) 和美国宇航局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的主被动土壤湿度卫星 (soil moisture active passive, SMAP)。SMOS 卫星任务是远程探测陆地上的土壤湿度和海洋表面的盐度^[8-9]。SMAP 卫星于 2015 年 1 月 31 日在美国发射, 主要是进行土壤湿度方面的研究, 但是由于其搭载 L 波段微波辐射计, 故也能进行海面盐度的反演研究。

收稿日期: 2020-07-13; 修回日期: 2020-09-22

基金项目: 江苏省省测绘地理信息局开放基金项目 (JSCHKY201904); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金面上项目 (2018491411); 连云港市“海燕计划”人才资助项目 (HYJH202021); 2020 年江苏省研究生实践创新计划项目 (SJCX20_1254)

[Foundation: Open Fund Project of Jiangsu Provincial Surveying, Mapping and Geographic Information Bureau, No. JSCHKY201904; National Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering Science, “Belt and Road” Water and Sustainable Development Technology Fund General Project, No. 2018491411; Lianyungang City “Haiyan Program” Talent Funding Project, No. HYJH202021; 2020 Jiangsu Province Postgraduate Practice Innovation Program Project, No. SJCX20_1254]

作者简介: 牛原 (1994—), 男, 硕士研究生, 河南林州人, 主要从事海洋遥感研究, E-mail: niuyuan_1994@yeah.net; 邱志伟 (1985—), 男, 通信作者, 硕士生导师, 主要从事海洋微波遥感研究, E-mail: qiuzhiwei-2008@163.com

相对来说,国内开展海面盐度研究起步较晚。1988年,华中科技大学与国家海洋局第二海洋研究所开展航空实验,利用自主研制的机载 L 波段微波辐射计观测海面盐度,其精度优于 $2^{[10]}$ 。随后在“十一五”期间,中国科学院国家空间科学中心基于机载实验数据对海面盐度进行了反演,获得了优于 0.2 的海面盐度反演精度。海面盐度反演精度受到很多因素的影响。卢红丽等^[11]基于 SMOS 数据提出了不修正系统偏差的大入射角反演方法能够较好地反演盐度。Yin 等^[12]基于 SMOS 卫星数据开展海面粗糙度研究工作,修正了双尺度模型(two-scale model, TSM),改善了模型算法效率。王迎强等^[13]利用 MPM93 模型仿真不同天气情况下的 L 波段大气辐射参数及盐度计观测亮温,研究不同天气情况对海面盐度反演值的影响。王进等^[14]基于 Aquarius 卫星数据对海面粗糙度参数化模型进行研究,反演的海面盐度精度优于 0.5。相比于国外,我国遥感卫星海面盐度探测的研究较为落后。直至 2015 年,我国首颗用于观测海面盐度的盐度遥感卫星项目才开始启动,计划于 2020 年发射升空。目前反演海面盐度精度无法达到优于 0.1 的精度,一直是困扰学术界的问题,虽然海洋方面研究日渐成熟,但是关于海面盐度反演的相关研究存在不足。

本文选取临近中国东海的西北太平洋地区为研究区域,选用的数据是 SMAP 卫星携带的 L 波段微波辐射计观测到的亮温数据,并以 Argo 浮标海面盐度作为验证数据。通过对西北太平洋海域风、浪等影响海面粗糙度的影响因子进行分析研究,改进海面盐度反演模型,运用牛顿法进行海面盐度反演,一定程度上提高海面盐度反演的精度,最后对海面盐度的空间地理特征进行相关分析。

1 数据与方法

1.1 研究区域及数据

研究区域位于太平洋西北部区域($130^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$),靠近中国东海,横跨北回归线,气候变化特征显著。通过反演该区域海面盐度、分析空间分布地理特征能够一定程度上了解中国东海区域乃至整个太平洋海域海-气变化。为了能够减少大陆近岸的影响,选取了相对远离陆地的海面区域,减少相关环境因素的影响。

SMAP 卫星搭载了双极化 L 波段微波辐射计,

配备一个直径为 6 m 的大孔径反射式天线,卫星对地观测的刈幅约为 $1\ 000\ \text{km}^{[15]}$ 。反演所需要的亮温数据采用 SMAP 卫星 25 km 网格分辨率数据,数据来源于美国冰雪数据中心(NSIDC) (<https://nsidc.org>),该数据集包含从 SMAP 卫星 L 波段微波辐射计导出的每日两次的增强亮度温度数据,属于 L1B 级网格化数据产品。本次实验共下载了 2019 年 1 月 1 日至 1 月 31 日的亮温数据以及欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) (<https://cds.climate.copernicus.eu>) 下载的海面风速 SSW 和有效波高 SWH 数据。实验所用到的温盐数据均来自于中国 Argo 实时资料中心 (<http://www.argo.org.cn/>)^[16]。

1.2 技术方法

技术流程如图 1。首先对实验数据进行预处理,然后对 Klein-Shift 模型(简称 K-S 模型)进行风、浪等环境因子造成的海面粗糙度改进,进而利用牛顿法进行反演,并与 Argo 实测海面盐度验证数据进行精度对比,最后分析研究区域内的海面盐度分布的地理空间特征。

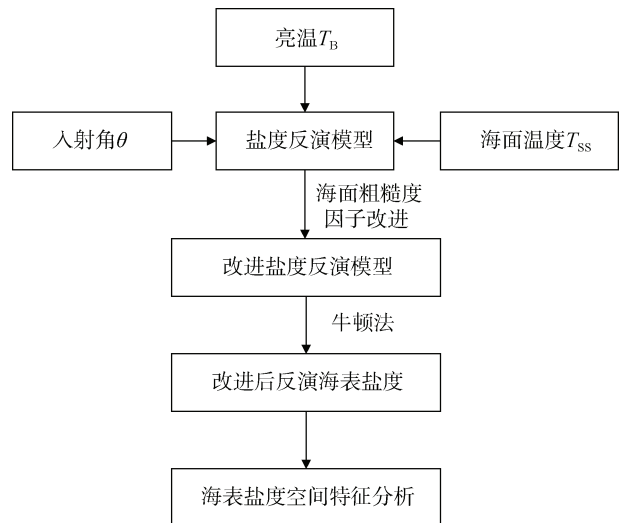


图 1 模型改进后的海面盐度反演技术流程图

Fig. 1 Flow chart of sea surface salinity inversion technology after model improvement

2 海面盐度微波遥感原理及模型改进

2.1 海面盐度微波遥感原理

微波遥感技术适用于海面盐度的反演,遥感卫星上搭载的 L 波段微波辐射计能够测得海表亮

温数据,再根据 K-S 模型就能够反演得到海面盐度^[17]。

由于海面情况复杂,其海面粗糙度变化比较明显,所以海表亮温 T_B 包括平静海表亮温 T_{B_flat} 和海面粗糙度造成的亮温增量 T_{B_rough} , 即

$$T_B(\theta, T_{SS}, S_{SS}, W_{SS}, H_{SW}) = T_{B_flat} + T_{B_rough}, \quad (1)$$

其中, T_{B_flat} 为平静海面的亮温, T_{B_rough} 为海面粗糙度引起的亮温增量,入射角为 θ , W_{SS} 和 H_{SW} 分别为海表面 10 m 高度处风速和有效波高。

平静海面状态下,亮温和海面温度、L 波段微波辐射计的海面发射率 $e(\theta)$ 有关,即

$$T_B(\theta, T_{SS}, S_{SS}) = e(\theta) \cdot T_{SS}. \quad (2)$$

在一定条件下,发射率 $e(\theta)$ 和菲涅尔反射率 $\rho(\theta)$ 、海水介电常数 ϵ_r 存在函数关系,即

$$e_H(\theta) = 1 - \rho_H(\theta) = 1 - \frac{\left| \cos\theta - \sqrt{\epsilon_r - \left(\frac{n}{n'}\right)^2 \sin^2\theta} \right|^2}{\left| \cos\theta + \sqrt{\epsilon_r - \left(\frac{n}{n'}\right)^2 \sin^2\theta} \right|^2}, \quad (3)$$

$$\epsilon_s = \left(87.134 - 1.949 \times 10^{-1} T_{SS} - 1.276 \times 10^{-2} T_{SS}^2 + 2.491 \times 10^{-4} T_{SS}^3 \right) \times \left(1 + 1.613 \times 10^{-5} S_{SS} \cdot T_{SS} - 3.656 \times 10^{-3} S_{SS} + 3.210 \times 10^{-5} S_{SS}^2 - 4.232 \times 10^{-7} S_{SS}^3 \right), \quad (6)$$

$$\tau = \left(1.768 \times 10^{-11} - 6.086 \times 10^{-13} T_{SS} + 1.104 \times 10^{-14} T_{SS}^2 - 8.111 \times 10^{-17} T_{SS}^3 \right) \times \left(1 + 2.282 \times 10^{-5} S_{SS} \cdot T_{SS} - 7.638 \times 10^{-4} S_{SS} - 7.760 \times 10^{-6} S_{SS}^2 + 1.105 \times 10^{-8} S_{SS}^3 \right), \quad (7)$$

$$\sigma = S_{SS} \left(0.182521 - 1.46192 \times 10^{-3} S_{SS} + 2.09324 \times 10^{-5} S_{SS}^2 - 1.28205 \times 10^{-7} T_{SS}^3 \right) \exp(-\delta\beta), \quad (8)$$

$$\delta = 25 - T_{SS}, \quad (9)$$

$$\beta = 2.033 \times 10^{-2} + 1.266 \times 10^{-4} \delta + 2.464 \times 10^{-6} \delta^2 - \left(1.849 \times 10^{-5} - 2.551 \times 10^{-7} \delta + 2.551 \times 10^{-8} \delta^2 \right) S_{SS}. \quad (10)$$

平静海表亮温与入射角、海面温度和海水的介电常数有关,最终可以表示为频率、入射角以及海面温度和盐度的函数,用 F 表示,即

$$T_B(\theta, T_{SS}, S_{SS}) = F(f, \theta, S_{SS}, T_{SS}, \epsilon_r). \quad (11)$$

通过获取相关数据,即可反演得到海面盐度,即

$$S_{SS} = F^{-1}[f, \theta, T_{SS}, T_B(\theta, T_{SS}, S_{SS}), \epsilon_r] \quad (12)$$

海面盐度 S_{SS} 变化会改变海水的介电常数 ϵ_r , 进而使海表亮温 T_B 发生变化^[20]。因此,通过微波辐射计观测到的海表亮温 T_B , 及其与海面盐度 S_{SS} 的函数关系,就可以利用海表亮温 T_B 数据反演出海面盐度 S_{SS} ^[21]。

2.2 模型改进

由于海面盐度的变化在微波辐射低频段对海水介电常数最为敏感,故海面盐度反演最佳的波段是

$$e_V(\theta) = 1 - \rho_V(\theta) = 1 - \frac{\left| \epsilon_r \cos\theta - \sqrt{\epsilon_r - \left(\frac{n}{n'}\right)^2 \sin^2\theta} \right|^2}{\left| \epsilon_r \cos\theta + \sqrt{\epsilon_r - \left(\frac{n}{n'}\right)^2 \sin^2\theta} \right|^2}, \quad (4)$$

其中, $\rho_H(\theta)$ 、 $\rho_V(\theta)$ 分别为水平和垂直极化菲涅尔反射率, n 为海水的复折射率, n' 为海水复折射率的实部^[18]。因为在海水中光的衰减较小,所以海水复折射率的虚部近似等于 0, 故 $n = n' \approx 1$ 。

海水的介电常数基于德拜方程表示,即

$$\epsilon_r(f, T_{SS}, S_{SS}) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 - (i\omega\tau)^{1-\alpha}} + i \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}, \quad (5)$$

其中, $\epsilon_r(f, T_{SS}, S_{SS})$ 为海水的介电常数; $\omega = 2\pi f$ 为角频率; ϵ_∞ 为无限高频相对电容率,通常取值为 4.9; ϵ_s 为静态相对电容率; τ 为张弛时间; α 是描绘弛豫时间分布的经验常数,其值很小,Grant 等^[19]测得 $\alpha = 0.02 \pm 0.007$, 一般情况下认为 $\alpha = 0$; σ 为离子电导率;真空中的电容率 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ (F/m)。其中 ϵ_s 、 τ 、 σ 是包含 S_{SS} 的参数,各个参数的解析表达式是由 Klein 和 Swift 在纯水和盐水实验测量的基础上获得的^[17], 即:

L 波段^[22]。在微波遥感中,海表亮温对于微波辐射计观测的极化方式、入射角等都有很大关系,故本实验选择和 SMAP 卫星同一入射角,即 40° 入射角来进行海面盐度反演。为了保证时空一致性,将下载到的海面亮温 T_B 、海面 10 m 高度处的风速 W_{SS} 、有效波高 H_{SW} 、海面温度 T_{SS} 、海面盐度 S_{SS} 等数据进行空间匹配处理,使用克里金插值法,将实验相关数据插值处理为同一分辨率,即 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格数据,以便实验所用。并对插值处理后的亮温、海面温度、风速、波高及海面盐度验证数据进行筛选,提取出实验所在区域相关数据。

影响海面盐度反演精度的海面因素细主要有海面粗糙度情况和海面温度等。海面粗糙度受到风速、波高的影响很大,因此选择风速和波高为表征海面

粗糙度的参量^[23]。通过对风速、波高等影响海面粗糙度的因子进行纠正,改进经验模型,提高粗糙海表亮温测量的精确度,进而优化海表亮温反演模型,提高反演精度。

根据星载辐射计传输原理,微波辐射计从太空观测到的空间总辐射亮温主要由 4 部分组成,分别是海表辐射、大气上行辐射、大气下行辐射和宇宙背景辐射亮温。本文选取的亮温数据是消除了宇宙背景辐射和大气辐射的海表辐射亮温, SMAP 卫星提供了风向、风速辅助数据造成的海表亮温偏差,在 SMAP 获取的海表亮温数据中去除辅助数据亮温偏差即可得到平静海面的亮温 T_{B_flat} 。

海水介电常数模型选取的是 K-S 模型,通过编程处理,将分离出的平静海表亮温代入 K-S 模型中利用牛顿法进行反演,得到平静海面的盐度。由于海面情况比较复杂,必须考虑海面粗糙度的影响。目前来看海面粗糙度模型主要有 3 种, Gabarro 等^[24]基于大量现场观测数据提出的粗糙度经验模型; Voronovich^[25]提出小斜率近似模型(small slope approximation, SSA)以及 Yueh 等提出的双尺度模型^[26-27]。经验模型相对于其他两种模型来说,算法简单,精度方面满足要求,故本文选择经验数据来拟合海面粗糙度模型。将 Argo 盐度运用正演的方式,获得对应的海表亮温。比较由正演方式获得的海表亮温和公式(1)计算得到的值,然后不断修改式中 T_{B_rough} ,直至正演值与计算值达到最佳匹配,则此时的 T_{B_rough} 即为海面粗糙度造成的亮温增量。 T_{B_rough} 与风速、有效波高线性相关,即

$$T_{B_Hrough} = P_1 \cdot W_{SS} + Q_1 \cdot H_{SW}, \quad (13)$$

$$T_{B_Vrough} = P_2 \cdot W_{SS} + Q_2 \cdot H_{SW}, \quad (14)$$

式中, P_1 、 Q_1 、 P_2 、 Q_2 代表拟合系数,具体数值如表 1 所示。

表 1 粗糙度亮温增量拟合

Tab. 1 Roughness brightness temperature incremental fitting

极化方式	P_1	Q_1	P_2	Q_2
水平极化	0.4	1.4		
垂直极化			0.2	1.4

图 2、图 3 分别表示入射角为 40°时,复杂海面情况下不同极化方式粗糙度对亮温造成的增量,大约在 2~6 K 之间,很大程度上会影响海面盐度的反演精度,导致海面盐度的偏差。

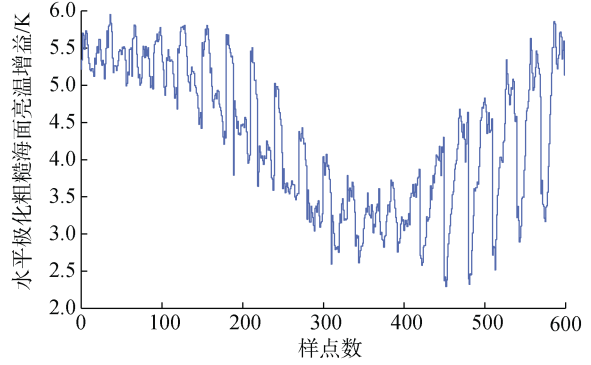


图 2 水平极化状态下粗糙海面对亮温造成的增量

Fig. 2 Increase in brightness temperature caused by the rough sea surface in the horizontal polarization

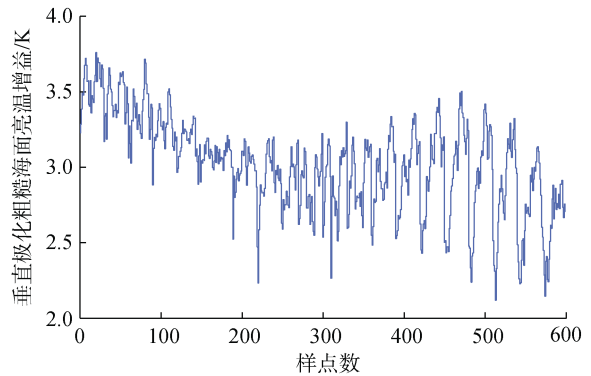


图 3 垂直极化状态下粗糙海面对亮温造成的增量

Fig. 3 Increase in brightness temperature caused by the rough sea surface in the vertical polarization state

对 K-S 模型作粗糙度亮温增量改进,海面粗糙度造成亮温增量和海面发射率的关系为:

$$e_{H_rough} = T_{B_Hrough} / T_{SS}, \quad (15)$$

$$e_{V_rough} = T_{B_Vrough} / T_{SS}. \quad (16)$$

对海面发射率作于粗糙度因子改进

$$e_H = T_{B_Hflat} / T_{SS} + e_{H_rough}, \quad (17)$$

$$e_V = T_{B_Vflat} / T_{SS} + e_{V_rough}. \quad (18)$$

将改进后的海面发射率 e_H 和 e_V 代入公式(2)中,可以得到极化条件下粗糙海表亮温 $T_{B_H}(\theta, T_{SS}, S_{SS}, W_{SS}, H_{SW})$ 、 $T_{B_V}(\theta, T_{SS}, S_{SS}, W_{SS}, H_{SW})$,再结合其他数据代入改进 K-S 模型中进行反演,其中改进 K-S 模型是指在德拜方程及其各参数解析式[式(5)—(10)]为主体的 K-S 模型下,结合式(11)—(12)函数关系基础上考虑海面粗糙度因素[式(13)—(18)]之后的海面盐度模型,可求出粗糙海面的盐度。

3 牛顿法反演海面盐度及其分析

牛顿法(Newton method)是在实复数领域求最优解

问题比较常用的方法，具有迭代收敛速度快的优点，算法较为简单^[28]。牛顿法对于初值选取要求高，且在遥感反演过程中，现场实测值多为点数据，且不一定都能获取，故本文选取 Argo 盐度气候平均资料作为其初值，消除了牛顿法初始值选取不当影响结果精度的问题，一定程度上优化其算法，提高了反演精度。将海面盐度反演的主要因素海表亮温、海面温度、海面 10 m 高度处的风速、有效波高等数据作为输入参数，在牛顿法中进行反演，得到反演的海面盐度。需要注意的是，如果 T_{SS} 、 W_{SS} 和 H_{SW} 等输入参数存在误差，会很大程度影响反演的精度，因此一定要避免此类误差。

反演的海面盐度和 Argo 盐度相关的程度取决于相关系数 R 值， R 值越大，说明两者之间越相关；反之相关程度越低。使用平均偏差 B_{IAS} 和均方根误差 R_{MSE} 来评估反演盐度与 Argo 盐度之间的偏差和反演盐度的精度。计算公式为：

$$B_{IAS} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (S_{ss反演} - S_{ssArgo}), \quad (19)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (S_{ss反演} - S_{ssArgo})^2}. \quad (20)$$

图 4 是改进 K-S 模型反演盐度与 Argo 盐度散点对比结果，从中可以看出，改进 K-S 模型反演盐度与 Argo 盐度相关系数 $R=0.99$ ，且平均偏差 B_{IAS} 和均方根误差 R_{MSE} 分别为 0.16 和 0.17，一定程度上反映了改进 K-S 模型反演盐度与 Argo 盐度之间偏差较小，精度较高。

残差在数理统计中是指实际观察值与估计值之间的差，本文指的是反演盐度和 Argo 盐度之间的差。为了能更好地比较出改进前后 K-S 模式反演盐度的精度效果，将两者残差进行对比。图 5 是 K-S 模型反演的盐度与 Argo 盐度进行结果对比之后的残差图，图 6 是改进 K-S 模型反演出来的盐度与 Argo 盐度进行结果对比之后的残差图。从图中可以看出 K-S 模型反演盐度残差集中在 ± 0.8 以内，反演精度较低；而改进 K-S 模型用牛顿法反演的精度在 ± 0.2 以内，反演精度较高，说明对 K-S 模型进行粗糙度改进提高了反演精度。可以看到图 6 中出现了残差的波动，主要是因为研究区域存在一些岛屿以及风、浪的影响了反演结果。王艺晴等^[29]利用神经网络法对海面盐度进行反演，结果表明反演盐度与实测数值相比残差集中在 0.6 以内，本文用牛顿法反演得盐度与实测数值相比残差集中在 0.2 以内，一定程度上说明在海面盐度反演上牛顿法较神经网络法精度更高。

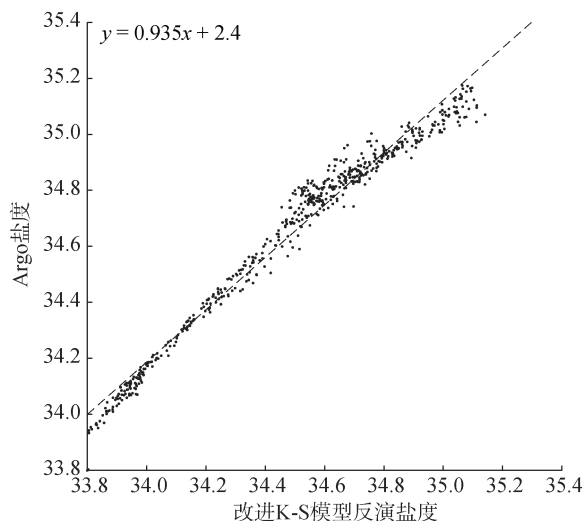


图 4 改进 K-S 模型反演盐度与 Argo 盐度散点对比图
Fig. 4 Improved K-S model to retrieve the comparison chart of salinity and Argo salinity scatter

注：黑色散点代表匹配数据点；虚线代表拟合趋势线

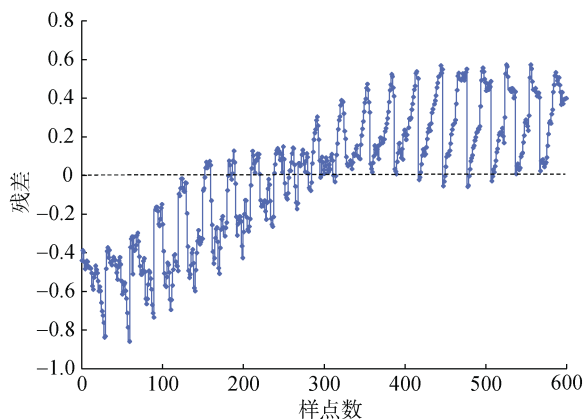


图 5 K-S 模型反演盐度与 Argo 盐度残差结果对比图
Fig. 5 Comparison chart of the K-S model inversion salinity and Argo salinity residual results

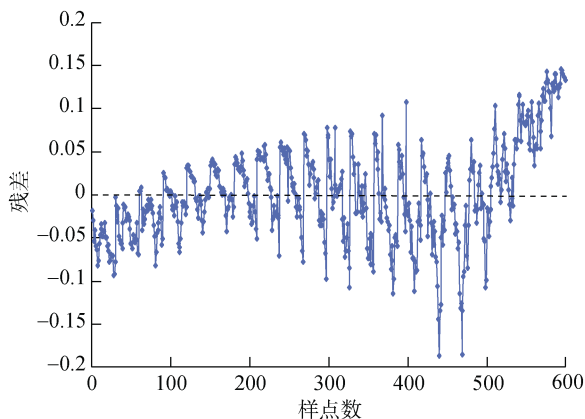


图 6 改进 K-S 模型反演盐度与 Argo 盐度残差结果对比图
Fig. 6 Comparison chart of residual salinity inversion between the improved K-S model and Argo salinity

图 7a 和图 7b 分别是基于 K-S 模型和改进 K-S 模型、运用牛顿法进行反演得出的海面盐度空间分布图,图 7c 是 Argo 盐度空间分布图。可以看出 K-S 模型反演盐度与 Argo 盐度存在较大偏差,基于改进 K-S 模型运用牛顿法反演盐度与 Argo 盐度在空间分布上趋于一致,反映出运用牛顿法进行反演精度高、效果好的特点。海面盐度的变化范围在 33.6~35.2,且具有明显的纬度分布特征,纬度越高,盐度越大。纬度较高区域,盐度自西向东逐渐增大,特别是在以(155°E, 25°N)为中心的海域盐度最高。这是因为越靠近大洋中心,蒸发量越大,远超出降水量,故盐度越高。图 7d 反映了基于改进后 K-S 模型的牛顿法反演盐度与 Argo 盐度偏差空间分布,偏差范围从-0.2~0.15,可以看出偏差由东向西依次增加,这可能与陆地射频干扰 RFI 的影响有关,越向西越靠近陆地,陆地 RFI 会影响亮温的测量,造成一定程度的盐度反演偏差。在(25°N, 150°~155°E)位置误差偏大,主要是因为该区域蒸发量大,加上风、浪的影响,使其海面粗糙度误差偏大,进而影响反演结果。研究区域中存在一些岛屿,导致部分数据丢失或出现偏差,影响了盐度的反演精度。

4 结论

本文根据 SMAP 卫星 L 波段微波辐射计测得的亮温数据,该数据消除了宇宙背景及大气辐射的干扰,并去除海面环境辅助因子造成的亮温偏差,获得平静海面的亮温进行盐度反演研究。考虑到海面复杂的情况,基于 K-S 模型做海面粗糙度的改进,利用牛顿法对改进前后的 K-S 模型进行反演实验对比,剖析偏差原因,最后对研究区域海面盐度空间分布作简要分析,结论如下。

1) 风、浪等因素造成的海面粗糙度对亮温影响较大,造成的亮温增量约为 2~6 K,很大程度上影响了盐度反演的精度。选取 40°左右的大入射角进行粗糙度亮温增量拟合,结果表明反演精度较高,改进效果明显,所以在海面盐度反演中一定要考虑海面粗糙度的影响。

2) 牛顿法在反演海面盐度的问题上,具有迭代收敛的速度快、算法相对简单和反演精度高的特点。本文通过选取 Argo 盐度的气候平均资料作为牛顿法反演的初始值,解决了牛顿法初始值选取不当造成精度偏差的问题,选取大范围区域进行反演,一定程度上消除了偶然性,通过对 600 个样本的反演结

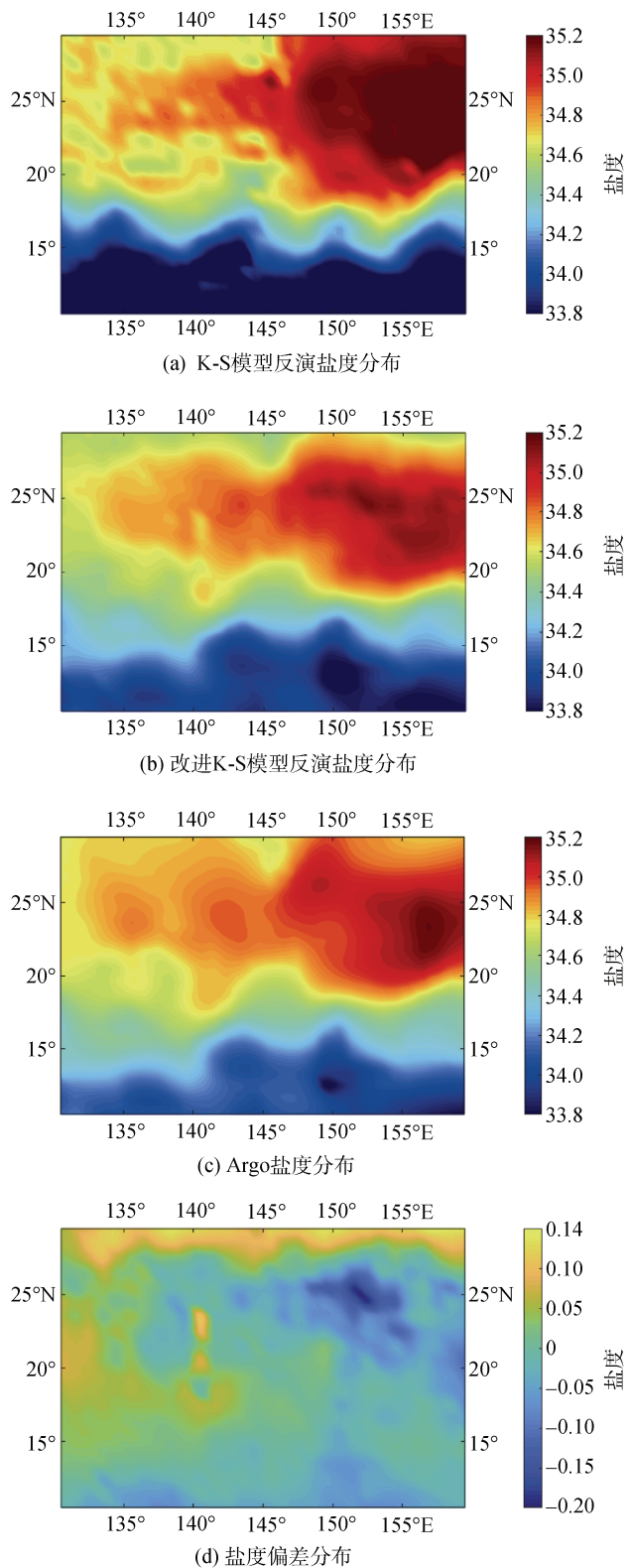


图 7 K-S 模型、改进 K-S 模型反演盐度与 Argo 盐度空间分布及偏差分布

Fig. 7 K-S model, improved K-S model inversion of salinity and Argo salinity spatial distribution and deviation distribution

果精度对比,结果显示改进 K-S 模型反演盐度与 Argo 盐度显著相关,且平均偏差 BIAS 和均方根误差 RMSE 分别为 0.16 和 0.17,一定程度上反映了改进 K-S 模型反演盐度与 Argo 盐度之间偏差较小,残差普遍集中在 ± 0.2 以内,反演精度较高。

3) 本研究反演精度没有达到理想的 0.1,后续还需要对大气辐射、宇宙背景辐射、陆地 RFI 等影响进行细化研究,继续提高其精度。

参考文献:

- [1] REUL N, TENERELLI J, CHAPRON B, et al. Modeling sun glitter at L-Band for sea surface salinity remote sensing with SMOS[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(7): 2073-2087.
- [2] HOLLINGER J. Passive microwave measurements of sea surface roughness[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1971, 9(3): 165-169.
- [3] SWIFT C, MCINTOSH E. Considerations for microwave remote sensing of ocean-surface salinity[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1983, 21(4): 480-491.
- [4] BLUME H, LOVE W, VAN M J, et al. Radiometric observations of sea temperature at 2.65GHz over the Chesapeake Bay[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1977, 25(1): 121-128.
- [5] TALONE M, SABIA R, CAMPS A, et al. Sea surface salinity retrievals from HUT-2D L-band radiometric measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(8): 1756-1764.
- [6] FORE A G, YUEH S H, TANG W Q, et al. Combined active/passive retrievals of ocean vector wind and sea surface salinity with SMAP[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(12): 7396-7404.
- [7] OLMEDO E, MARTINEZ J, TURIEL A, et al. Debiased non-Bayesian retrieval: A novel approach to SMOS Sea Surface Salinity[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 193: 103-126.
- [8] FONT J, CAMPS A, BORGES A, et al. SMOS: the challenging sea surface salinity measurement from space[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 649-665.
- [9] KERR Y, WALDTEUFEL P, WIGNERON J, et al. The SMOS mission: new tool for monitoring key elements of the global water cycle[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 666-687.
- [10] 雷震东, 曾原, 林士杰, 等. 航空微波遥感海水盐度的研究[J]. *宇航学报*, 2010, 13(2): 62-67.
LEI Zhendong, ZENG Yuan, LIN Shijie, et al. Research on seawater salinity remote sensing by aerial micro-wave[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 13(2): 62-67.
- [11] 卢红丽, 王振占, 殷晓斌. 利用 SMOS 卫星数据反演海洋盐度方法研究[J]. *遥感技术与应用*, 2014, 29(3): 401-409.
LU Hongli, WANG Zhenzhan, YIN Xiaobin. Research on the retrieval of ocean salinity using SMOS satellite data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014, 29(3): 401-409.
- [12] YIN X B, BOUTIN J, DINNAT E, et al. Roughness and foam signature on SMOS-MIRAS brightness temperatures: A semi-theoretical approach[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 180: 221-233.
- [13] 王迎强, 严卫, 王也英, 等. 大气对星载盐度计辐射传输特性及盐度反演的影响研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(2): 350-360.
WANG Yingqiang, YAN Wei, WANG Yeying, et al. The influence of the atmosphere on the radiation transmission characteristics and salinity inversion of a spaceborne salinometer[J]. *Journal of Peking University (Natural Science Edition)*, 2018, 54(2): 350-360.
- [14] 王进, 张杰, 王晶. 基于 Aquarius 数据的粗糙海面 L 波段辐射模型研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(5): 125-132.
WANG Jin, ZHANG Jie, WANG Jing. Research on L-band radiation model of rough sea surface based on Aquarius data[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2018, 48(5): 125-132.
- [15] 马文韬. 基于 Aquarius 卫星的盐度遥感偏差与复杂海面微波辐射研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
MA Wentao. Salinity remote sensing deviation based on aquarius satellite and microwave radiation on complex sea surface [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [16] 李宏, 刘增宏, 许建平, 等. 全球海洋 Argo 网格数据集(BOA-Argo)用户手册[R]. 杭州: 中国 Argo 实时资料中心, 2017.
LI Hong, LIU Zenghong, XU Jianping, et al. User manual of global ocean argo grid dataset (BOA-Argo) [R]. Hangzhou: China Argo Real-time Data Center, 2017.
- [17] KLEIN L, SWIFT C T. An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, 25(1): 104-111.
- [18] 李志. 海洋表层盐度遥感反演机理及应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
LI Zhi. Research on remote sensing inversion mechanism and application of ocean surface salinity [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [19] GRANT E H, BUCHANAN T J, COOK H F. Dielectric behavior of water at microwave frequencies [J]. *The*

- Journal of Chemical Physics, 1957, 26(1): 156-161.
- [20] 周博天. 海面盐度多源遥感协同反演方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
ZHOU Botian. Research on multi-source remote sensing cooperative inversion method of sea surface salinity [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- [21] 李青侠, 张靖, 郭伟, 等. 微波辐射计遥感海洋盐度的研究进展[J]. 海洋技术, 2007, 26(3): 58-63.
LI Qingxia, ZHANG Jing, GUO Wei, et al. Research progress of remote sensing ocean salinity by microwave radiometer[J]. Ocean Technology, 2007, 26(3): 58-63.
- [22] LAGERLOEF G, SWIFT C T, LE VINE D M. Surface Salinity: The Next Remote Sensing Challenge[J]. Oceanography, 1995, 8(2): 44-50.
- [23] 王杰, 矫玉田, 曹勇, 等. 海表面盐度遥感技术的发展与应用[J]. 海洋技术, 2006, 25(3): 76-81.
WANG Jie, JIAO Yutian, CAO Yong, et al. Development and application of remote sensing technology for sea surface salinity[J]. Ocean Technology, 2006, 25(3): 76-81.
- [24] GABARRO C, FONT J, CAMPS A, et al. A new empirical model of sea surface microwave emissivity for salinity remote sensing[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(1): 169-178.
- [25] VORONOVICH A. Small-slope approximation for electromagnetic wave scattering at a rough interface of two dielectric half-spaces[J]. Waves in Random Media, 1994, 4: 337-367.
- [26] YUEH S, WILSON W, LI F. Modeling of wind direction signals in polarimetric sea surface brightness temperatures[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(6): 1400-1418.
- [27] TALONE M, SABIA R, GOURRION J. Simulated SMOS levels 2 and 3 products: The effect of introducing ARGO data in the processing chain and its impact on the error induced by the vicinity of the coast [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(9): 3041-3049.
- [28] 龙熙华. 数值分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000.
LONG Xihua. Numerical analysis[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2000.
- [29] 王艺晴, 韩震, 周玮辰, 等. SMAP 卫星海表面亮温仿真及海表面盐度遥感反演[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(2): 365-371.
WANG Yiqing, HAN Zhen, ZHOU Weichen, et al. SMAP satellite sea surface brightness temperature simulation and sea surface salinity remote sensing inversion[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(2): 365-371.

Inversion method of sea surface salinity based on microwave remote sensing technology

NIU Yuan, QIU Zhi-wei, CHANG Yu-jia, WU Zhen-yu, PAN Chun-tian

(School of Marine Technology and Geomatics, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

Received: Jul. 13, 2020

Key words: sea surface salinity; inversion method; K-S model improvement

Abstract: Sea surface salinity is an important physical quantity in studying ocean changes and climate effects, which are very significant to the marine ecological environment and the sustainable development of the ocean. To improve the accuracy of the sea surface salinity inversion, the brightness temperature data measured by the SMAP L-band microwave radiometer is used to study the sea surface salinity inversion, and the Klein-Shift (K-S) model is improved by considering environmental factors such as wind and waves that affect the sea surface roughness. Comparing the salinity retrieved by Newton's method with the measured salinity of Argo, results show that the improved K-S model inversion salinity has a significant correlation with the Argo salinity correlation coefficient $R = 0.99$, the average deviation and root mean square error are respectively 0.16 and 0.17, and the residuals are basically distributed within 0.2. For the K-S model, the inversion accuracy is improved by about 0.5. In general, the improved K-S model has a small deviation between the salinity inversion and the Argo salinity, the inversion accuracy is better than the other two, and the spatial distribution tends to be consistent. Moreover, the spatial variation of sea surface salinity has obvious geographic characteristics of latitude distribution.

(本文编辑: 丛培秀)