# SMOS 与 Aquarius 卫星海表盐度测量方法及数据的对比分析

陈之薇<sup>1,2</sup>,李青侠<sup>1,2</sup>,李 炎<sup>3</sup>

(1. 华中科技大学电子信息与通信学院,湖北 武汉 430074; 2. 多谱信息处理技术重点实验室,湖北 武汉 430074;
 3. 中国科学院国家空间科学中心,北京 100190)

摘 要:国际上发射的海表盐度遥感卫星主要有 2 颗:欧洲的 SMOS 和美国的 Aquarius 卫星,为给后续海表 盐度遥感提供参考借鉴,对比分析了这 2 颗卫星的遥感器载荷、数据处理算法和盐度数据。遥感器载荷方面, SMOS采用 L 波段二维综合孔径辐射计,而 Aquarius采用 L 波段实孔径辐射计加散射计;数据处理算法方面,分 析了二者在介电常数模型、海面粗糙度校正以及反演算法方面的差异;盐度数据方面,分析了 SMOS 与 Aquarius盐 度数据之间的相关程度,并分别与 ISAS(In Situ Analysis System)浮标盐度数据作对比,分析了 2 颗卫星的盐度数 据精度。将 2 颗卫星的盐度遥感数据与 ISAS 浮标盐度数据对比发现,在全球范围内,Aquarius 盐度测量精度优于 SMOS;但在开阔海域,SMOS 盐度测量精度优于 Aquarius;而在近海岸区域,均出现较大的误差,且 SMOS 数据误 差更大。

关键词:海表盐度;盐度反演; SMOS; Aquarius; 微波遥感;反演算法; 定标; 数据精度 中图分类号:TP79 文献标志码:A DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.005

# Comparison and Analysis of Sea Surface Salinity Measurement Method and Data Between SMOS and Aquarius

CHEN Zhiwei<sup>1,2</sup>, LI Qingxia<sup>1,2</sup>, LI Yan<sup>3</sup>

(1. School of Electronic Information and Communications, Huazhong University of Science and Technology,

Wuhan 430074, Hubei, China;

Key Laboratory of Science & Technology on Multi-Spectral Information Processing, Wuhan 430074, Hubei, China;
 3.National Space Science Center, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: There are two main satellites for remote sensing of sea surface salinity (SSS) launched in the world: the SMOS from Europe and the Aquarius from the United States. In order to provide references for subsequent remote sensing of sea surface salinity, the two satellites are compared in three aspects: payload, data processing algorithm and salinity data. For payload, SMOS uses a L-band two-dimensional radiometer, while Aquarius uses a L-band real aperture radiometer and a scatterometer; for data processing algorithms, the differences between two satellites in dielectric constant models, sea surface roughness correction and retrieval algorithms are analyzed; for salinity data, the correlation between SMOS and Aquarius in salinity data is analyzed, and compared with ISAS buoy salinity data respectively, the accuracy of salinity data of two satellites is analyzed. By comparison, it is found that the salinity data accuracy of Aquarius is better than that of SMOS from global perspective. However, in the open sea area, the salinity data accuracy of SMOS is better than that of Aquarius; in the offshore area, there are relatively big errors for the salinity data of both satellites, and the error is even bigger in the salinity data of SMOS.

**基金项目**:国家自然科学基金(41176156,61771213,41505015);中央高校基本科研业务费资助(2016JCTD203);上海航天科技创新基金(SAST2017113,SAST2016087,SAST2015032);湖北省重大科技创新计划项目(2015AEA074)

收稿日期:2017-11-02;修回日期:2018-02-07

作者简介:陈之薇(1993-),女,博士,主要研究方向为海表盐度遥感、海表温度遥感等。

**Keywords:** sea surface salinity; salinity retrieval; SMOS (soil moisture and ocean salinity); Aquarius; microwave remote sensing; retrieval algorithm; calibration; data accuracy

0 引言

目前,国际上海表盐度(SSS)遥感卫星有 SMOS、 Aquarius 和 SMAP 卫星。其中 SMAP 卫星主要用于 土壤湿度遥感,虽也可提供海表面盐度遥感数据,但 不能满足盐度遥感精度要求。故本文仅比较分析 SMOS 和 Aquarius 这 2 颗卫星。

SMOS 和 Aquarius 同为 L 波段海表盐度遥感卫 星。但 SMOS 采用世界首台二维综合孔径式辐射计 MIRAS<sup>[1]</sup>,而 Aquarius<sup>[2]</sup>则采用实孔径辐射计与散射 计结合的主被动观测方式。2 颗卫星的观测方式不 同,导致盐度数据的处理算法存在差异。为得到高精 度盐度数据,SMOS 和 Aquarius 测量数据都进行了一 系列处理<sup>[3-4]</sup>,包括外部干扰校正、天线误差校正和辅 助参数校正等。因为 2 颗卫星的载荷及处理算法不 同,其盐度数据精度亦不同。通过对比这 2 颗卫星的 遥感器载荷、数据处理算法和盐度数据,总结得出二 者的优缺点,及需要进一步研究的问题。以期为后续 海洋盐度遥感的相关研究提供参考,特别是为我国的 海洋盐度遥感载荷的研制提供借鉴。

1 海表盐度测量方法对比

#### 1.1 载荷的技术指标

SMOS 于 2009 年 11 月 2 日发射,并在次日成 功展开天线臂,星上搭载了世界首台二维综合孔径 式辐射计 MIRAS。Aquarius 由美国和阿根廷合作 研制,并于 2011 年 6 月 10 日发射。卫星的主载荷 由美国宇航局(NASA)负责,采用 3 个实孔径辐射 计加散射计的配置。二者各有优势与特点<sup>[5-6]</sup>,其配 置与关键技术指标见表 1。

表 1 SMOS 和 Aquarius 卫星载荷配置及关键技术指标的比较

Tab.1 Comparison of satellite payload configuration and key specifications between SMOS and Aquarius

卫星	SMOS	Aquarius
发射时间	2009 年 11 月	2011 年 6 月
观测载荷	二维干涉式综合孔径辐射计	实孔径辐射计加散射计
天线	Y型可展开天线阵	可展开抛物面天线
频段	1. 413 GHz	辐射计:1.41 GHz;散射计:1.26 GHz
极化	H、V 或全极化	H、V和45°倾斜极化
入射角	0°~55°	28.7°, 37.8°, 45.6°
分辨率	$30 \sim 90 \text{ km}$	76 km×94 km,84 km×120 km,97 km×156 km
幅宽	900 km	390 km
稳定度	0.8~2.2 K	辐射计稳定度 0.13 K <sup>[7]</sup> ,散射计稳定度 0.1 dB <sup>[8]</sup>
定标精度	1.2∼1.35 K <sup>[9]</sup>	<1 K <sup>[7]</sup>

从表1中可得出以下结论:

1)SMOS 与 Aquarius 的设计寿命均为 3 年。 目前,SMOS 仍然在轨运行;而 Aquarius 因为设备 故障于 2015 年 6 月 8 日停止工作<sup>[10]</sup>。

2)欧洲的 SMOS 卫星采用综合孔径体制,并且 后续的卫星计划依然沿用这一体制;而美国的 Aquarius 卫星采用主被动联合体制,包括现在在轨的 土壤湿度探测卫星 SMAP 也采用这一方式,这些卫 星各有特点和优势。

3) SMOS 搭载的 MIRAS 辐射计采用二维稀疏 天线阵干涉测量,其采用了每个天线支臂有 23 个天 线单元的 Y 型阵; Aquarius 则是辐射计与散射计共用一副 2.5 m 单折叠抛物面天线。

4)SMOS 的入射角范围覆盖 0°~55°; Aquarius 则为固定的入射角。

5)由于任务需要,SMOS分辨率能同时兼顾海 表盐度及土壤湿度的测量;而 Aquarius 任务为海洋 盐度测量,分辨率无法满足土壤湿度测量的要求。

6)SMOS 通过大入射角来保证大幅宽, Aquarius 则通过 3 个波束组合实现幅宽。由于 SMOS 的 幅宽更宽,可实现 3 天 88 个半轨数据的全球重访周 期; 而 Aquarius 则需要 7 天 103 个轨道数据才能覆 盖全球。

#### 1.2 轨道特性

SMOS 和 Aquarius 都选择了太阳同步的晨昏 轨道来避免太阳光照的影响。不同的是, SMOS 选 择的降交点是上午 06:00, 而 Aquarius 选择的则是 下午 06:00。为满足地面分辨率、重访周期和覆盖 率的需求, SMOS 轨道高度为 763 km (倾斜角为 98°), Aquarius 为 657 km (倾斜角为 32.5°)。

如图1所示,在同一时间段,红色线为 SMOS 的一轨数据的轨迹图,蓝色线为 Aquarius 的轨迹 图。从图1可看出,因2颗卫星轨道不同,运行轨迹 呈相反的形状,因 SMOS 有更宽的刈幅,红色轨迹 比蓝色轨迹宽。由于 SMOS 的 L1c 级数据是将海 洋和陆地数据分开处理的,故在红色轨迹线上出现 空白区域,而这块区域属于陆地范围。



图 1 SMOS 和 Aquarius 运行轨迹 Fig.1 Moving trajectories of SMOS and Aquarius

#### 1.3 定标方法

SMOS采用的定标方法是噪声注入和冷空定标<sup>[11]</sup>。MIRAS辐射计系统构成复杂,不能采用传统的两点定标或简单的 Dicke 定标方法对系统定标,必须针对不同的误差,通过分步定标的方法,消除其对系统测量精度的影响,从而达到定标的目的。

因系统在轨运行时仪器的温度随时间而变化, 辐射计测量结果包含一些误差,故在轨过程中需进 行周期性定标。将定标过程分为短定标、长定标、自 定标和冷空定标,如表2所示。

其中,短定标采用噪声二级注入定标,通过二级 相关噪声的注入,获得 fringe-washing 函数(FWF) 在零点的取值,完成系统通道的幅度、相位以及功率 检波器(PMS)的校正,短定标每次持续34.8 s。长 定标将进行噪声二级定标和残留可见度函数校正, 通过输入二级相关噪声完成幅度、相位校正和 PMS 定标;通过输入匹配负载产生的非相关噪声,完成残 留可见度函数校正,长定标每次持续6 004 s。自定 标是完成设备在轨时由本振带来的正交误差和同相 误差校正,每次持续4.8 s。冷空定标是对系统绝对 定标,完成去归一化处理的过程;冷空定标时,卫星 调整姿态,天线朝向冷空观测,冷空观测时间为 310 s。为不影响卫星对地观测时间,定标的总长度 设定为不超过整个系统工作时间的1%。自定标每 隔21 min进行一次,短定标每隔 24 h 一次,冷空定 标每隔2周一次,长定标每隔4周一次。

表 2 SMOS 在轨定标过程

Tab.2	In-orbit	calibration	process	of	SMOS
-------	----------	-------------	---------	----	------

过程	模式	描述	目的
标合卡	唱書決入会長	<b>石</b> 太昭 军 分 1	幅度、相位校正;
超足协	· 柴户往八疋你	相大咪尸任八	PMS 校正,获得 FWF 在零点取值
长定标	噪声注入定标; 残留可见度函数校正	非相关噪声注入; 相关噪声注入	残留可见度函数校正; 幅度、相位校正; PMS校正
自定标	自定标	归一化相关系数	正交(I/Q)幅相误差校正
冷空定标	冷空定标	噪声注入辐射计绝对定标	校正噪声注入辐射计(NIR),实现绝对定标

Aquarius 的定标过程包含其1级数据的处理 过程,Aquarius 定标主要包含噪声定标<sup>[12]</sup>、冷空定 标<sup>[7]</sup>及全量程定标<sup>[13]</sup>等几部分。

Aquarius 中配置的相关噪声二极管提供参考的 注入噪声,用以校正接收机信号的相位和振幅,从而 定标包括第三 Stokes 参数亮温在内的极化数据<sup>[12]</sup>。 冷空定标<sup>[7]</sup>通过对 2.73 K 宇宙背景辐射的观测对辐射计绝对定标。Aquarius 冷空定标时,平台沿俯仰旋转 180°,使观测波束朝向宇宙远端,从而获得对宇宙背景辐射的观测。

此外,Aquarius还可进行全量程定标<sup>[13]</sup>,包括 观测天空、海洋、陆地的定标。 2 数据处理算法对比

## 2.1 介电常数模型

在 SMOS 和 Aquarius 盐度测量方法中,一个显著的不同在于海水介电常数模型的选取。SMOS 选取的是 Klein-Swift 模型<sup>[14]</sup>,而 Aquarius 选取的 是 Meissner-Wentz 模型<sup>[15]</sup>。

Klein-Swift 模型是来自于 1.43 GHz 和2.653 GHz 频率的实验数据,并且基于简单的 Debye 方程

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}' + \mathbf{i}\boldsymbol{\varepsilon}'' = \boldsymbol{\varepsilon}_{\infty} + \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_{s} - \boldsymbol{\varepsilon}_{\infty}}{1 + \mathbf{i}(2\pi f_{0})\tau} - \frac{\mathbf{i}\gamma}{(2\pi f_{0})\boldsymbol{\varepsilon}_{0}} (1)$$

式中: $\epsilon_{\infty}$ 为频率无限大时的介电常数(当温度为 0~ 30 ℃,盐度为 23~39 psu 时, $\epsilon_{\infty}$  变化范围为 4.6~ 8.5); $\epsilon_{0}$ 为真空介电常数,取值8.854 101 2 F/m; $\epsilon_{s}$ 为静态介电常数; $\tau$  为弛豫时间; $\gamma$  为海水离子电导 率; $f_{0}$ 为辐射频率(单位为 GHz)。这些参数中, $\epsilon_{s}$ 、  $\tau$ 和 $\gamma$ 都是和海表盐度 S 和海表温度  $T_{s}$  相关的量, 计算公式为

$$\varepsilon_{s} = [m(1) + m(2) \times T_{s} + m(3) \times (T_{s})^{2} + m(4) \times (T_{s})^{3}] \times [m(5) + m(6) \times T_{s} \times S + m(7) \times S + m(8) \times S^{2} + m(9) \times S^{3}]$$
(2)  
$$\tau = [t(1) + t(2) \times T_{s} + t(3) \times (T_{s})^{2} + m(6) \times S^{3}]$$
(2)

$$t(4) \times (T_s)^3 ] \times [t(5) + t(6) \times T_s \times S + t(7) \times S + t(8) \times S^2 + t(9) \times S^3 ]$$
(3)



$$\gamma = S[s(1) + s(2) \times S + s(3) \times S^{2} + s(4) \times S^{3}] \times \exp\{(T_{s} - 25)\{s(5) + s(6) \times (25 - T_{s}) + s(7) \times (25 - T_{s})^{2} - S[s(8) + s(9) \times (25 - T_{s}) + s(10) \times (25 - T_{s})^{2}]\}\}$$
(4)

计算所需的系数 m(i)、t(j)和 s(k)均为拟合系数。

Meissner-Wentz 模型则衍生于 Wentz 的介电 常数模型,比 Klein-Swift 模型有更大的频率适用范 围。并且该模型基于双 Debye 模型

$$\varepsilon_{r}(T_{s},S) = \frac{\varepsilon_{s} - \varepsilon_{1}}{1 + \mathrm{i}f_{0}/f_{1}} + \frac{\varepsilon_{1} - \varepsilon_{\infty}}{1 + \mathrm{i}f_{0}/f_{2}} + \varepsilon_{\infty} - \mathrm{i}\frac{\gamma}{(2\pi\varepsilon_{0})f_{0}}$$
(5)

式中: $\epsilon_1$  为中频介电常数; $f_1$  和  $f_2$  分别为一次和 二次 Debye 弛豫频率(单位为 GHz); $\epsilon_{\infty}$  和  $\epsilon_0$  同 式(1);静态介电常数  $\epsilon_s$ 来自修正后的 Wentz 模型。

图 2 比较了 SMOS 和 Aquarius 介电常数模型 根据海表盐度和海表温度的变化。对比发现,两 种模型计算的差异主要体现在实部。海表温度为 20 ℃时,随海表盐度的变化,Aquarius 模型计算出 的介电常数实部低于 SMOS;海表盐度为 35 psu 时,Aquarius 模型计算出的介电常数实部在低温 (小于 5 ℃)时高于 SMOS,而在高温(大于 25 ℃) 时则低于 SMOS,在中间温度段吻合得较好。



图 2 SMOS 和 Aquarius 介电常数的实部与虚部随海表盐度和海表温度的变化



#### 2.2 海面粗糙度的校正

SMOS 卫星粗糙度校正依据第三方的欧洲中期 天气预报中心(ECWMF)数据中的风速、波龄和波高 数据,通过 3 种模型模拟粗糙度的亮温贡献,这必然 会引入由数据的时间和空间不同步带来的误差。当 盐度数据为空间分辨率为 1°的月均数据时,ECMWF 数据会为盐度反演引入0.26 psu的误差<sup>[16]</sup>。

而 Aquarius 卫星在运行初期,依据来自国家环境预报中心(NCEP)提供的海面风场信息进行粗糙度校正,故任何 NCEP 的预报误差都会对粗糙度修 正造成影响,进而导致盐度反演的误差。同时,运用 NCEP 的数据也会带来数据时间和空间不同步的问题。故在后续的版本中,Aquarius 利用星上散射计获得数据,并采用主被动联合反演(CAP)的方法处 理数据,校正风场引起的粗糙度带来的误差<sup>[17-18]</sup>。

将 CAP 得到的海面风速同 SSMI/S(Special Sensor Microwave Imager Sounder)和 ECMWF 的风速测量结果对比发现, Aquarius 的主被动联合方法有更好的精度<sup>[19-21]</sup>, 见表 3。

表 3 SSMI/S、ECMWF 和 CAP 风速反演精度对比

Tab.3 Comparison of wind speed retrieval accuracy among SSMI/S, ECMWF and CAP

来源	SSMI/S	ECMWF	CAP
风速精度/(m•s <sup>-1</sup> )	0.714	0.828	0.700

比较 2013 年 8 月 18 日的 SMOS 辅助数据 ECM-WF 和 Aquarius 散射计测量的中国南海区域的风速,如图 3 所示。从图 3 可看出,两个来源的风速数据差别较大,必然会造成两个卫星反演盐度结果不同。

理论上,就粗糙度校正而言,Aquarius 依靠散 射计可更加有效地校正粗糙度对盐度测量的影响, 从而可提高海表盐度的反演精度。



图 3 SMOS 海表风速和 Aquarius 海表风速匹配情况 Fig.3 Matching result of SMOS sea surface wind speed and Aquarius sea surface wind speed

## 2.3 盐度反演算法

SMOS 的盐度反演方法采用迭代算法(最优化 算法)。盐度反演中使用的代价函数<sup>[24]</sup>为

$$\chi^{2} = \sum_{i=0}^{N_{m}-1} \frac{\left[I_{bi}^{meas} - I_{bi}^{mod}(\theta, S)\right]^{2}}{(\sigma_{T_{bi}})^{2}} + \sum_{j=0}^{N_{s}-1} \frac{\left[S_{j} - S_{j}^{piror}\right]^{2}}{(\sigma_{S_{j}})^{2}}$$
(6)

式中: $N_m$  为代价函数中参与反演的第一 Stokes 参数个数; $N_s$  为待反演参数的个数, $N_s$  取值为 1;  $I_{\text{Ii}}^{\text{meas}}$ 为多角度测量亮温转换的第一 Stokes 参数;  $I_{\text{Ii}}^{\text{mead}}(\theta,S)$ 为对应角度和盐度参数计算的亮温转换的 第一 Stokes 参数; $S_j$  为盐度变量, $S_j^{\text{piror}}$  为  $S_j$  的先验 值; $\sigma_{S_j}$ 为盐度参数的先验误差,其取值和观测区域的 状态相关; $(\sigma_{T_{\text{Ii}}})^2$  为亮温测量的不确定度。

该算法构造式(6)的代价函数,选取 LM(Levenberg-Marquard)最优化算法<sup>[22-23]</sup>寻找使式(6)达到最 小时的盐度值,该盐度值即为盐度的反演值。

第一 Stokes 参数与亮温关系为

$$I = T_{\rm B,V} + T_{\rm B,H} \tag{7}$$

模型亮温为

 $T_{\mathrm{B},p}(\theta,S) = (1-P) \left[ T_{\mathrm{B},\mathrm{flat},p}(\theta,S) + \right]$ 

 $T_{B,rough,p}(\theta,S)$ ]+P・ $T_{B,foam,p}(\theta,S)$  (8) 式中:p=H,V为辐射计极化方式;P为泡沫覆盖 率,取值范围为0到1; $\theta$ 为入射角; $T_{B,flat,p}(\theta,S)$ 、  $T_{B,rough,p}(\theta,S)$ 和 $T_{B,foam,p}(\theta,S)$ 分别为平静海面亮 温、粗糙海面亮温和被泡沫覆盖的海面亮温。

图 4 为运用 LM 迭代反演算法进行反演的流 程图。1)初始化所有参数,计算物理参数的先验误 差,标记反演的初始值,准备辅助数据;2)运用初始 参数计算代价函数的初始值,反演迭代开始;3)运用 正向模型计算梯度和海森矩阵;4)在迭代过程中更 新反演参数,然后用新的参数值计算新的代价函数 的值;5)判定代价函数,若其值增加,则减小 Marquardt 放大系数 $\lambda$ ;6)若代价函数较之以前减小,则 增大 Marquardt 放大系数 $\lambda$ ,然后计算新的梯度和海 森矩阵;7)当反演满足收敛准则时,保存反演结果退 出循环,计算反演结果的误差方差,反演过程结束。

Aquarius 早期数据版本中的盐度反演方法是 Wentz 等<sup>[25]</sup>提出的半经验反演算法,该算法假定海 面盐度与海面亮温和海面风速之间近似存在一种线 性关系,从天线温度出发依次减去银河系、各天体、 地球大气及海面粗糙度的亮温贡献,通过匹配各参 数统计回归得到一组系数,从而确定该线性方程以





用于盐度反演。

但 Aquarius 后期数据版本开始使用 CAP 方法。CAP 算法(2.0版本)由 Yueh 等<sup>[21]</sup>于 2013 年提出,该算法基于海面的 L 波段主被动联合观测数据同时反演海面盐度、风速及风向。CAP 算法中的代价函数为

$$F_{\rm CAP}(S, v_{\rm s}, \varphi) = \frac{(I - I_{\rm m})^2}{2\Delta T^2} + \frac{(\sqrt{Q^2 + U^2} - \sqrt{Q_{\rm m}^2 + U_{\rm m}^2})^2}{2\Delta T^2} + \frac{(\sigma_{\rm VV} - \sigma_{\rm VVm})^2}{k_{\rm pc}^2 \sigma_{\rm VV}^2} + \frac{(\sigma_{\rm HH} - \sigma_{\rm HHm})^2}{k_{\rm pc}^2 \sigma_{\rm HH}^2}$$
(9)

从式(9)可看出,CAP算法中用 Stokes 矢量亮温,有

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{\mathrm{B,V}} + T_{\mathrm{B,H}} \\ T_{\mathrm{B,V}} - T_{\mathrm{B,H}} \\ U \end{bmatrix} \propto \begin{bmatrix} \langle |E_{\mathrm{V}}|^{2} \rangle + \langle |E_{\mathrm{H}}|^{2} \rangle \\ \langle |E_{\mathrm{V}}|^{2} \rangle - \langle |E_{\mathrm{H}}|^{2} \rangle \\ 2\mathrm{Re}\langle E_{\mathrm{V}}E_{\mathrm{H}}^{*} \rangle \end{bmatrix}$$
(10)

式中: $v_s$ 和 $\varphi$ 分别为风速和相对风向;I,Q,U为Aquarius 辐射计测得的辐射计亮温转换成的 Stokes 分量; $E_v$ 与 $E_H$ 分别为垂直极化电场和水平极化电 场; $I_m,Q_m,U_m$ 为与盐度、温度、风速和风向有关的 正向模型亮温转换成的 Stokes 分量; $\sigma_{VV},\sigma_{HH}$ 为散 射计测得的海面后向散射系数; $\Delta T$ 为辐射计噪声 的等效亮温; $k_{pc}^2$ 为散射计的噪声方差; $\sigma_{VVm}$ 和 $\sigma_{HHm}$ 为与风速和风向有关的后向散射系数模型。

用 CAP 算法构造式(9)的代价函数,选用最优 化算法寻找使目标函数最小的盐度值、风速及风向 值,其中的盐度值即为反演的盐度值。

转换成 Stokes 分量的模型亮温有

$$T_{\mathrm{B},p}(S,T_{\mathrm{s}},v_{\mathrm{s}},\varphi) = T_{\mathrm{B},p,\mathrm{flat}}(S,T_{\mathrm{s}}) + T_{\mathrm{s}} \cdot \Delta e_{p}(v_{\mathrm{s}},\varphi)$$
(11)

式中: $T_{B,p,flat}$ 为与盐度和温度有关的平静海面亮温;  $\Delta e_{p}$ 为粗糙度引起的海面发射率变化。

CAP 算法的代价函数采用 Stokes 参量平方和的形式,避免了法拉第旋转的误差。

# 3 海表盐度数据对比

本文比较的 SMOS 与 Aquarius 海表盐度数据 有 2 种:1)L2 级别数据,直接从亮温数据中反演得 到的盐度数据,即单次测量数据;2)L3/L4 级别数 据,利用 L2 级别的盐度数据网格进行时空平均后 的盐度数据。

#### 3.1 数据的相关程度

3.1.1 Aquarius 数据与 SMOS 数据的相关程度

由于 Aquarius 和 SMOS 的空间分辨率及刈幅 宽度的差别,为对比 2 颗卫星 L2 级别数据,将 SMOS 的数据映射到  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的尺度上。选取 2013 年8 月 18 日 Aquarius 和 SMOS 的海洋盐度 数据,如图 5 为 Aquarius 和 SMOS — 天数据共同 覆盖到的部分的差异值(Aquarius-SMOS)。





一天中 Aquarius 和 SMOS 匹配(共同覆盖)到的 数据为6 145 个,从图 5 可看出,在中纬度的开阔海域, 2颗卫星的测量数据结果较相近,且 SMOS 的数据结 果略偏高;但靠近两极区域则有较大的差距,Aquarius 的数据结果偏高。图 6 计算了图 5 中一天的 Aquarius 和 SMOS 共同覆盖到的数据的相关程度。



图 6 SMOS 和 Aquarius — 天海洋盐度数据相关性 Fig.6 Relativity of data of daily mean sea salinity from SMOS and Aquarius

从图 6 可得出, Aquarius 和 SMOS — 天数据的 相关程度为 0.503 9。之后又选取 2013 年 8 月 19 日和 20 日的数据进行匹配, 计算出来的结果也 十分相似: 19 日匹配 6 160 个, 相关程度为 0.479 4; 20 日匹配 6 370 个, 相关程度为 0.508 7。对照表 4, Aquarius 和 SMOS — 天数据的相关程度约为 0.5, 相关程度中等。

表 4 相关系数和数据相关程度的关系 Tab.4 Relativity of correlation coefficient and correlation degree

相关系数	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0.0~0.2
相关程度	极强	强	中等	弱	极弱/无

对比 2 颗卫星经过时空平均后的网格化盐度数据,选取 2013 年 8 月的 Aquarius 和 SMOS 的 L3 级别数据,网格大小为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。图 7 为 2 颗卫星月 均盐度数据的差异图。

从图 7(c)可看出,绝大多数开阔海域的数据差异在 0.5 psu 以内,在某些近海区域和靠近两极(高纬度) 区域,数据差异较大,达到或超过 2 psu。图 8 计算了图 7 中月均 Aquarius 和 SMOS 数据的相关程度。

从图 8 中可看出, Aquarius 和 SMOS 匹配到的 29 922 个数据的相关系数为 0.701 3, 为强相关。总 体来说, 相比于单次测量结果, 月均数据使数据相关 性有所提高。

为进一步说明两个数据间的相关性,表5分析 了2013年中12个月的月均数据相关程度。从表5 中可看出,经过时空平均后,月均数据的相关程度确



图 7 Aquarius 和 SMOS 月均海洋盐度数据匹配

Fig.7 Matching of data of monthly mean sea salinity from SMOS and Aquarius



图 8 SMOS 和 Aquarius 月均(2013 年 8 月)海洋盐度数据相关性 Fig.8 Relativity of data of monthly mean sea salinity from SMOS and Aquarius in August, 2013

实会提高;对比每个月之间的结果又发现,4月的数据相关度最高,10月的相关度最低。

3.1.2 卫星数据与实测数据的相关程度

选取 Argo 海面浮标数据作参照<sup>[26-28]</sup>,将其看 作盐度的真实值,分别比较 Aquarius 和 SMOS 盐 度数据的相关程度。

由于 Argo 浮标测量的数据具有时空分布不规则的缺点,法国海洋开发研究所 CORIOLIS 设计开发了基于最优插值技术的 ISAS 温盐分析系统。 ISAS 数据利用有限覆盖的 Argo 浮标数据,结合理论模型和其他来源的盐度数据,提供了高精度的盐度地面测量数据<sup>[29]</sup>,故本文采用 ISAS 数据。

# 表 5 SMOS 和 Aquarius 月均数据相关性与匹配个数(2013 年)

 
 Tab.5
 Matching quantity and correlation of monthly data between SMOS with Aquarius in 2013

月份	匹配个数	相关系数	月份	匹配个数	相关系数
1月	30 986	0.7989	7月	30 050	0.698 5
2月	31 180	0.808 5	8月	29 922	0.703 1
3月	29 211	0.823 2	9月	29 870	0.704 1
4月	30 549	0.8701	10月	29 631	0.6891
5月	30 139	0.852 1	11 月	29 515	0.7079
6月	30 005	0.858 0	12 月	30 199	0.750 2

表 6 计算了 2013 年 1 月至 12 月的卫星数据同 ISAS 数据的相关程度。总体来说, SMOS 月均数 据同 ISAS 数据的相关程度较高, 大部分都在 1 左 右;但 Aquarius 月均数据较 SMOS 明显偏低, 特别 是 7 月至 9 月的数据, 说明这 3 个月的盐度测量数 据高于 ISAS 的实测数据。

- 表 6 Aquarius 和 SMOS 月均数据同 ISAS 数据的 匹配与相关性(2013 年)
- Tab.6Matching and correlation of Aquarius and SMOSmonthly mean data with ISAS data in 2013

日八	ISAS 与 Aquarius		ISAS 与 SMOS	
万历	匹配个数	相关系数	匹配个数	相关系数
1月	32 768	0.9117	31 594	0.955 4
2月	32 973	0.895 1	31 944	0.985 6
3月	31 757	0.8519	32 041	0.955 2
4月	32 048	0.913 6	31 377	0.9510
5月	31 714	0.926 2	30 947	1.004 3
6月	31 488	0.959 3	30 795	1.046 1
7 月	31 757	0.624 4	30 936	1.001 3
8月	32 028	0.600 9	30 780	0.983 0
9月	32 242	0.732 8	30 718	0.9939
10月	32 064	0.747 9	30 338	1.032 7
11月	31 425	0.803 0	30 227	1.036 1
12 月	32 029	0.937 4	30 784	1.019 4

虽然 SMOS 同 ISAS 实测数据的相关性较 Aquarius 好,但并不能说明 SMOS 的盐度测量精度 就高于 Aquarius,下面分别针对全球范围及区域范 围来分析 2 颗卫星的盐度测量精度。

## 3.2 卫星数据的测量精度分析

将 ISAS 的数据作为盐度地面测量的"真实 值",进而分析卫星遥感数据的精度。

图 9(a)为 ISAS 浮标测量的月均盐度数据,同

Aquarius 和 SMOS 的卫星遥感月均数据(2013 年 8月, 同图 7)比较, 结果见图 9(c)。



图 9 SMOS 和 Aquarius 月均海洋盐度数据同实测数据的差别 Fig.9 Differences of Aquarius and SMOS monthly mean sea salinity data with Argo data

基于图 9 的比较结果,从 2 颗卫星数据的全球 测量精度以及区域数据的精度两个方面分析。

为了定量评估精度,这里计算误差均值及均方 根误差。测量数据 x<sub>obs</sub>即为 SMOS 和 Aquarius 卫 星测量的盐度数据,作为参考真值的数据 x<sub>true</sub>为 ISAS 浮标测量的海面盐度数据,故测量的误差可表 示为

$$e_i = x_{\text{obs},i} - x_{\text{true},i} \tag{12}$$

误差均值指所有误差值的平均值

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} e_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_{\text{obs},i} - x_{\text{true},i}) \quad (13)$$

平均是为消除测量的随机误差,故均值应该和真值 最接近。在测量学中,通常用均方根误差(RMSE) 衡量观测值同真值之间的偏差,其表达式为

$$e_{\text{RMS}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (x_{\text{obs},i} - x_{\text{true},i})^2 / N}$$
 (14)

为方便比较,将2颗卫星的数据与 ISAS 实测数据的误差均值 *M* 和均方根误差 *e*<sub>RMS</sub>绘制成对月份变化的曲线,如图 10 所示。

由图 10 可看出, Aquarius 的误差均值小于 SMOS,同时 Aquarius 的均方根误差也小于 SMOS,表明 Aquarius 的盐度测量精度更高。由于 Aquarius 运用的是实孔径的观测手段,虽然相比



图 10 SMOS 和 Aquarius 全球月均数据的误差均值 及均方根误差随月份的变化



SMOS的综合孔径辐射计有分辨率低和角度信息 少等缺点,但在全球范围内,却有更高的亮温测量稳 定度。

从图 10 可看出,不同区域卫星测量数据的误差有差别。有必要分析不同海域的精度。

3.2.1 开阔海域

开阔海域因远离陆地污染及射频干扰(RFI, Radio Frequency Interference)的影响,一般有更好 的盐度测量精度。表7选取5个不同的开阔海域, 对比其盐度测量精度。为方便与前面的结果对比, 图11标示了这5个区域在地图上的位置。



Tab.7 Selection of open sea areas

编号	区域名称	缩写	位置
1	北太平洋	NPO	$10^{\circ} \sim 30^{\circ} \text{N}, 130^{\circ} \sim 180^{\circ} \text{E}, 160^{\circ} \sim 100^{\circ} \text{W}$
2	南太平洋	SPO	35°~15°S,160°~100°W
3	北大西洋	NAO	20°~35°N,65°~30°W
4	南大西洋	SAO	$45^\circ \sim 15^\circ \mathrm{S}, 30^\circ \sim 5^\circ \mathrm{W}$
5	印度洋	INO	$40^{\circ} \sim 10^{\circ} \mathrm{S}, 60^{\circ} \sim 90^{\circ} \mathrm{E}$

分别计算和分析 5 个区域的 SMOS 和 Aquarius 数据,将计算结果绘制成随月份变化的曲线,如 图 12 所示。

从图 12 可看出,在这 5 个开阔海域,大多数月份的 SMOS 的月均测量误差均值及均方根误差都小于 Aquarius。虽然全球范围 SMOS 的盐度测量精度不如 Aquarius,但 SMOS 在开阔海域的表现优







图 12 SMOS 和 Aquarius 在 5 个开阔海域月均数据精度 Fig.12 Monthly mean data accuracy of SMOS and Aquarius in five open sea areas

于 Aquarius。

### 3.2.2 海岸区域

对于海岸区域,盐度测量会受到陆地污染及 RFI的影响<sup>[30]</sup>,故海岸区域的盐度遥感一直是难 点,其测量精度明显低于开阔海域。表8选取了5 个不同的近海区域,对比其盐度测量精度。为方便 和前面的结果对比,图13标示了这5个区域在地图 上的位置。

表 8 海岸区域的选取

Tab.8 Selection of coastal area	Tab.8	Selection	of	coastal	area	5
---------------------------------	-------	-----------	----	---------	------	---

编号	区域名称	位置
1	NPO靠近加拿大和阿拉斯加州	$165^{\circ} \sim 135^{\circ} W, 45^{\circ} \sim 60^{\circ} N$
2	南大洋靠近智利和阿根廷	$85^{\circ} \sim 55^{\circ} W, 60^{\circ} \sim 40^{\circ} S$
3	NAO 靠近欧盟诸国	25°~5°E,35°~60°N
4	INO 靠近印度	$45^\circ \sim 75^\circ E, 5^\circ \sim 25^\circ N$
5	NPO 靠近中国台湾	$105^{\circ} \sim 135^{\circ} E, 10^{\circ} \sim 30^{\circ} N$





分别计算和分析这 5 个区域的 SMOS 和 Aquarius 数据的测量精度并将计算结果绘制成随月 份变化的曲线,如图 14 所示。从误差均值看,二者 在海岸区域的测量均存在较大误差,在区域 1, SMOS 和 Aquarius 的测量误差比较接近,而在区域 2~5 的多数月份,Aquarius 的测量误差均值明显小 于 SMOS。从均方根误差看,在区域 1、2、5 中,二者 测量结果大多数接近,但在区域 3 和 4 中,某些月份 SMOS 的均方根误差大于 Aquarius,甚至 SMOS 测 量 的 海岸 盐度 在 某些月份 的 均 方根误差达到 1.8 psu。说明在近海区域 Aquarius 的测量精度高 于 SMOS。

4 结束语

从海表盐度测量方法、数据处理算法和盐度数据3个方面,对比分析了 SMOS 和 Aquarius 2 颗盐度卫星。

在盐度遥感器载荷体制方面,SMOS采用综合 孔径辐射计,有较高的空间及时间分辨率,可同时满 足海洋盐度遥感及土壤湿度遥感的需求,但定标系 统更复杂;Aquarius采用高稳定度的实孔径辐射计 及散射计联合测量,空间分辨率达到了海洋盐度遥



图 14 SMOS 和 Aquarius 在 5 个海岸区域的月均数据精度 Fig.14 Monthly mean data accuracy of SMOS and Aquarius in five coastal areas

感的需求,但没达到土壤湿度遥感的需求,故后来美国于 2015 年发射了另一颗卫星 SMAP 用于测量土壤湿度。

在海面粗糙度校正方面,SMOS 的粗糙度校正 依靠第三方的 ECWMF 数据中的风速、波龄和波高 数据,但因时间、空间不同步而带来误差。Aquarius 后来版本中同时利用星上散射计获得的数据,采用 CAP 算法处理数据,避免了时间、空间不同步带来 的误差,故利用散射计与辐射计同时测量的 Aquarius 卫星能更加有效地校正粗糙度。

反演算法方面,SMOS采用LM最优化算法使构造的代价函数最小化,得到盐度值。Aquarius在早期使用的是半经验算法,在后来的数据版本中开始采用CAP算法作为其官方算法之一,CAP算法同样是最小化其所构造的代价函数反演盐度,但其代价函数不同,引入了散射计同步测量数据,减少了海面粗糙度对盐度反演精度的影响。

在数据质量上,对比 SMOS 卫星和 Aquarius 卫星之间的 L3 级数据发现,SMOS 和 Aquarius 的 月均盐度数据之间的相关程度高于单日测量。将 2 颗卫星的盐度遥感数据与 ISAS 浮标盐度数据对 比发现,在全球范围内,Aquarius 盐度测量精度优 于 SMOS;但在开阔海域,SMOS 盐度测量精度优 于 Aquarius;而在近海岸区域,均出现较大的误差, 且 SMOS 数据误差更大。

未来的盐度遥感研究需要考虑以下问题:1)在 盐度遥感器载荷的选择问题上,综合孔径辐射计有 更高的空间及时间分辨率,而实孔径辐射计有更高 的稳定度,结合散射计的同步测量也可达到较高的 测量精度;2)从原理上看,L波段微波辐射计可兼顾 土壤湿度遥感和海洋盐度遥感,但土壤湿度遥感与 海洋盐度遥感对空间分辨率及测量精度的要求不一 样,可选择一颗卫星实现海表盐度和土壤湿度遥感, 也可用两颗卫星分别实现。这些问题均需要在总体 设计的时候综合论证。

除了上述需要选择论证的问题外,还需要进一步研究的问题有:1)2颗卫星的盐度遥感数据在近海区域误差均较大;2)目前 SMOS 和 Aquarius 都不能有效解决 RFI 问题,使部分测量数据无效或精度受到影响。

在数据处理方面,SMOS和 Aquarius 卫星的数据处理算法不断改进、数据处理软件的版本不断升级,使其数据产品精度也不断提升。这种提高遥感数据精度的方法值得借鉴。

#### 参考文献

- [1] BARRE H M, DUESMANN B, KERR Y H. SMOS: the mission and the system[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46 (3): 587-593.
- [2] LE VINE D, LAGERLOEF G, Yueh S, et al. Aquarius mission technical overview[C] // IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium, Denver, CO, USA, 2006: 1678-1680.
- [3] CAMPS A, DUFFO N, VALL-LLOSSERA M, et al. Sea surface salinity retrieval using multi-angular L-band radiometry: numerical study using the SMOS end-to-end performance simulator[C] // IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toronto, Ontario, Canada, 2002: 1123-1125.
- [4] WENTZ F J, LE VINE D. Algorithm theoretical basis document Aquarius level-2 radiometer algorithm: revision 1 [R]. RSS Technical Report, 2008 (4):

012208.

- [5] LAGERLOEF G, COLOMB F R, LE VINE D, et al. The aquarius/SAC-D mission: designed to meet the salinity remote-sensing challenge[J]. Oceanography, 2008, 21(1): 68-81.
- [6] 唐治华. 国外海洋盐度与土壤湿度探测卫星的发展 [J]. 航天器工程, 2013, 22(3): 83-89.
- [7] DINNAT E P, LE VINE D M, PIEPMEIER J R, et al. Aquarius L-band radiometers calibration using cold sky observations
   [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(12): 5433-5449.
- [8] FORE A G, NEUMANN G, FREEDMAN A P, et al. Aquarius scatterometer calibration[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(12): 5424-5432.
- [9] CORBELLA I, TORRES F, DUFFO N, et al. MIR-AS calibration and performance: results from the SMOS in-orbit commissioning phase [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(9): 3147-3155.
- [10] KAREN N. International Spacecraft Carrying NASA's Aquarius instrument ends operations [EB/ OL]. [2015-06-18]. http://www.nasa.gov/press-release/international-spacecraft-carrying-nasa-s-aquarius-instrument-ends-operations.
- [11] BROWN M A, TORRES F, CORBELLA I, et al. SMOS calibration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(3): 646-658.
- [12] PIEPMEIER J, BINDLISH R, BROWN S, et al. Aquarius radiometer post-launch calibration for product version 2[Z]. Aquarius Project Document: AQ-014-PS-0015, 2013.
- [13] DINNAT E P, LE VINE D M, BINDLISH R, et al. Aquarius whole range calibration: celestial sky, ocean, and land targets [C] // 13th IEEE Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad), Pasadena, CA, USA, 2014: 192-196.
- [14] 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, 1977, 25(1): 104-111.
- [15] MEISSNER T, WWNTZ F J. The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and Earth incidence angles[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sens-

ing, 2012, 50(8): 3004-3026.

- [16] SABIA R, CAMPS A, VALL-LLOSSERA M, et al. Impact on sea surface salinity retrieval of different auxiliary data within the SMOS mission [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(10): 2769-2778.
- [17] YUEH S. Aquarius CAP algorithm and data user guide[Z]. Jet Propul. Lab., Pasadena, Calif, 2013.
- [18] FREEDMAN A, MCWATTERS D, SPENCER M. The Aquarius scatterometer: an active system for measuring surface roughness for sea-surface brightness temperature correction [C] // IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium, Denver, CO, USA, 2006: 1685-1688.
- [19] STOFFELEN A. Toward the true near-surface wind speed: error modeling and calibration using triple collocation[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(C4): 7755-7766.
- [20] VOGELZANG J, STOFFELEN A, VERHOED A, et al. On the quality of high-resolution scatterometer winds[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2011, 116(C10), C10033.
- [21] YUEH S H, WENQING T, FORE A G, et al. Lband passive and active microwave geophysical model functions of ocean surface winds and applications to aquarius retrieval [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(9); 4619-4632.
- [22] MARQUARDT D W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters[J]. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 1963, 11(2): 431-441.
- [23] WALDTEUFEL P, BOUTIN J, KERR Y. Selecting

an optimal configuration for the soil moisture and ocean salinity mission [J]. Radio Science, 2003, 38 (3): 16.

- [24] CAMPS A, FONT J, VALL-LLOSSERA M, et al. Determination of the sea surface emissivity at L-band and application to SMOS salinity retrieval algorithms: review of the contributions of the UPC-ICM [J]. Radio Science, 2008, 43(3): 1-16.
- [25] MEISSNER T, WENTZ F, LAGERLOED G, et al. The Aquarius salinity retrieval algorithm [C] // 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012; 386-388.
- [26] PABLOS M, PILES M, GONZÁLEZ-GAMBAU V, et al. SMOS and aquarius radiometers: inter-comparison over selected targets[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(9): 3833-3844.
- [27] ROEMMICH D, GILSON J. The 2004—2008 mean and annual cycle of temperature, salinity, and steric height in the global ocean from the Argo program[J]. Progress in Oceanography, 2009, 82(2): 81-100.
- [28] RISER S C, REN L, WONG A. Salinity in Argo[J]. Oceanography, 2008, 21(1): 56.
- [29] GAILLARD F, AUTRET E, THIERRY V, et al. Quality control of large Argo datasets[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(2): 337-351.
- [30] LI Y, LI Q, LANG L, et al. Correction of SMOS data in coastal area of south China sea based on land contamination analysis[C] // IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, China, 2016: 7667-7670.