

引用格式: Wang Xinxin, Zhao Dongzhi, Yang Jianhong, *et al.* Progress in SSS (Sea Surface Salinity) Microwave Remote Sensing by Satellite[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(5): 671-679. [王新新, 赵冬至, 杨建洪, 等. 海表面盐度卫星微波遥感研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(5): 671-679.]

海表面盐度卫星微波遥感研究进展

王新新^{1,2}, 赵冬至², 杨建洪², 王 祥^{1,2}

(1. 大连海事大学环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116026;

2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

摘要:海表面盐度 SSS(Sea Surface Salinity)是研究大洋环流和海洋对全球气候影响的重要参量、是决定海水基本性质的重要因素之一。卫星微波遥感可以满足盐度研究过程中大范围、连续观测的需要,国际上统一的认识是选择频率为 1.413 GHz 的 L 波段作为盐度遥感的首选波段。目前,国外发展的海面盐度微波遥感反演算法主要有两种:基于海表发射率估算海表盐度的算法和基于贝叶斯定理提出的反演算法。影响盐度反演精度的因素主要有太空辐射、电离层法拉第旋转、大气、海面粗糙度等。其中,海面粗糙度对盐度反演影响很大,海面粗糙度处理模型可以分为 3 大类:理论算法(间接发射率模型、直接发射率模型)、经验算法、半经验半理论算法(Hollinger 半经验模型、WISE 半经验模型、Gabarró 模型)。SMOS 卫星和 Aquarius/SAC-D 卫星的成功发射,将海表面盐度遥感的反演精度控制在 0.2 psu 以内,通过改进反演算法,有望得到更高的反演精度。

关键词:海表面盐度;亮温;表面发射率;微波遥感;反演算法

中图分类号: TP 722.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2012)05-0671-09

1 引 言

海表面盐度 SSS(Sea Surface Salinity)是海洋的一个重要物理、化学参量,是决定海水基本性质的重要因素之一。海洋环流和全球水循环是海洋—气候系统中的两个重要组成部分,它们的相互作用导致盐度发生变化,从而影响海洋储存和释放热能的能力,并且影响海洋调节地球气候的能力^[1-2]。海洋盐度是描述海洋环流的关键变量,对海洋盐度进行观测可以加强对全球水循环的理解,同时它也是研究水团的重要流量示踪物^[3]。海洋盐度在海洋碳循环中也起到了重要作用,为估计海洋吸收释放 CO₂ 提供了可靠的参量依据^[4-5]。

国际上从 20 世纪 70 年代开始进行航空盐度遥感技术的研究和实验,但在此之后相当长的时间里,因为受到技术限制,盐度遥感的精度无法提高,所以

盐度遥感的研究几乎处于停滞状态^[6-7]。近年来,极端的气候变化导致自然灾害频频发生,人们意识到大洋盐度变化在气候系统中的重要作用,所以盐度遥感再次受到重视。从目前的研究进展来看,盐度遥感是唯一可行的大范围、连续观测方法,克服了现场盐度数据远远不能满足研究需要的困难^[8]。

目前有两颗在轨卫星在观测海表面盐度:欧洲空间局 ESA(European Space Agency)的 SMOS(Soil Moisture and Ocean Salinity)卫星;美国宇航局 NASA(National Aeronautics and Space Administration)和阿根廷空间局 CONAE(Comisión Nacional de Actividades Espaciales)共同开发的 Aquarius/SAC-D 卫星,两颗卫星都已经升空,并且根据它们的数据反演出海表盐度的相关产品。本文着重介绍了盐度微波遥感的反演算法及影响因素,并介绍了当前两颗在轨卫星的相关参数和产品。

收稿日期:2011-11-22;修订日期:2012-04-13

基金项目:海洋公益性行业科研专项经费项目(20090592)。

作者简介:王新新(1989—),男,辽宁盘锦人,硕士研究生,主要从事海洋表层盐度卫星微波遥感方面的研究。E-mail: gulf5136@sina.com。

通讯作者:赵冬至(1964—),男,辽宁辽阳人,博士,研究员,博士生导师,主要从事赤潮、溢油、水质和海洋生态环境的卫星遥感与 GIS 相关技术研究。E-mail: dzzhao@nmemc.gov.cn。

2 海水盐度微波遥感原理

根据瑞利—金斯定律,黑体的辐射度 $L(f)$ 与表面温度的关系为:

$$L(f) \cong \frac{2f^2 k_b T}{c^2} = \frac{2k_b T}{\lambda^2} \quad (1)$$

其中:波尔兹曼常数 $k_b = 1.38 \times 10^{-23} \text{ (J} \cdot \text{K}^{-1})$; T 为黑体物理温度,单位为 K, c 为光速, f 为频率, λ 为波长。

由于地球本身不是黑体,而是灰体,所以发射的辐射也比相应的黑体要少。利用瑞利—金斯公式计算得到的亮度温度对应该辐射亮度的黑体的物理温度,具有温度量纲,但是不具有温度的涵义,只是辐射亮度的代名词,本身不同于真正意义上的海表温度。由于灰体的辐射比相应黑体少,亮度温度也会比真正意义上的海表温度小^[9]。

亮温可以表示为两个方面的总和:完全平静海面发射的亮温和由于海面粗糙度而导致的亮温增量^[10-11]:

$$T_{b,p}(\theta, \text{SST}, \text{SSS}, \text{P}_{\text{rough}}) = T_{b,\text{Flat},p}(\theta, \text{SST}, \text{SSS}) + \Delta T_{b,\text{rough},p}(\theta, \text{SST}, \text{SSS}, \overrightarrow{\text{P}}_{\text{rough}}) \quad (2)$$

其中: $T_{b,\text{Flat},p}$ 为平坦海面发射的亮温, p 为极化状态(H/V极化), $\Delta T_{b,\text{rough},p}$ 为由于海面粗糙度而导致的亮温增量, θ 为入射角, SST 为海表温度, SSS 为海表盐度。

海表面辐射亮温 $T_b(\theta)$ 和实际的海表面温度 SST 通过发射率 $e(\theta)$ ($e(\theta)$ 是 L 波段的海表面发射率,它携带了盐度的主要信息)相联系:

$$T_b(\theta) = e(\theta) \cdot \text{SST} \quad (3)$$

在镜面条件下,发射率 $e(\theta)$ 和菲涅尔反射率 $\rho(\theta)$ 存在如下函数关系:

$$e(\theta) = 1 - \rho(\theta) \quad (4)$$

对于平静海面,水平(H)和垂向(V)极化条件下,菲涅尔反射系数可以定义为海水介电常数和入射角的函数,它们分别为:

$$\rho_H(\theta) = |R_H(\theta)|^2 = \left| \frac{\cos\theta - \sqrt{\epsilon_r - \left(\frac{n}{n'}\right)^2 \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon_r - \left(\frac{n}{n'}\right)^2 \sin^2\theta}} \right|^2 \quad (5)$$

$$\rho_V(\theta) = |R_V(\theta)|^2 = \left| \frac{\epsilon_r \cos\theta - \sqrt{\epsilon_r - \left(\frac{n}{n'}\right)^2 \sin^2\theta}}{\epsilon_r \cos\theta + \sqrt{\epsilon_r - \left(\frac{n}{n'}\right)^2 \sin^2\theta}} \right|^2 \quad (6)$$

其中: $R_H(\theta)$ 、 $R_V(\theta)$ 分别为水平和垂直极化菲涅尔反射系数, θ 为入射角, ϵ_r 为海水的相对复电容率,

$n = \sqrt{\epsilon_r}$ 为海水的复折射率; n' 为海水复折射率的实部。

因此对于平静海面来说, $T_{\text{hflat}}(\theta)$ 和 $T_{\text{vflat}}(\theta)$ 可以按照以下方式计算^[10]:

$$T_{\text{hflat}}(\theta) = (1 - \rho_h(\theta)) \cdot \text{SST} \quad (7)$$

$$T_{\text{vflat}}(\theta) = (1 - \rho_v(\theta)) \cdot \text{SST} \quad (8)$$

海水的介电常数取决于温度和盐度,它可以通过 Debye 方程求出:

$$\epsilon_r(\omega, T, S) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 - (i\omega\tau)^{1-\delta}} + i \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (9)$$

其中: $\epsilon_r(\omega, T, S)$ 为海水的相对复电容率; $\omega = 2\pi f$ 为电磁波的角频率; T 为海表温度; S 为海表盐度; ϵ_∞ 为无限高频相对电容率; ϵ_s 为静态相对电容率; τ 为张弛时间; δ 为经验常数; σ 为离子电导率; 真空中的电容率 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ (F/m)}$ 。

根据 Klein-Shift 模式^[12],由亮温、海水相对介电常数和海表面盐度之间的关系可知,亮温 T_b 最终可以表示为频率(f)、入射角(θ)、极化(H/V)、以及海表面温度(T)和盐度(S)的函数,即:

$$T_{bp} = F(f, \theta, S, T) \quad (10)$$

若其他参量已知,则可以由亮温反演出海表面盐度,即:

$$S = F^{-1}(T_{bp}, f, \theta, T) \quad (11)$$

由上述推导可知,从平静海面的亮度温度公式可以看出,海面的亮度温度与极化角、方位角、海面状态、海水温度和海水的介电常数有关,而海水的介电常数与海水盐度、海水温度和射频有关,海水的介电常数本身是盐度、温度和射频的函数。海洋盐度变化会改变海水的介电常数,进而使海面辐射的微波亮温发生变化。因此,应用微波辐射计观测海水的亮温,再通过亮温与盐度的关系,应用算法进行盐度反演,就可以从微波辐射计得到的亮温数据中反演出海水的盐度^[13]。

对于微波辐射计波段的选择,相关研究表明,较低的射频频率对于盐度测定比较敏感,但是低射频对于电离层的法拉第旋转更加敏感,需要很大的天线孔径来保持同样的空间分辨率。所以合理的折中之后选择频率以 1.413 GHz 为中心的宽度为 20 MHz 的波段^[14]。该波段在通常所说的 L 波段中,是受到国际条约保护的,用于无线电天文学研究的波段,不存在人为信号的干扰;此外,云对该波段的影响可以忽略,除了大雨天气外,可以进行全天候观测,因此该波段是盐度遥感的首选波段^[7]。

3 盐度遥感反演算法及影响因素

3.1 盐度遥感反演算法

Wentz 等^[15] 提出由海表发射率估算海表盐度的算法。此算法作为 Aquarius/SAC-D 卫星 Level-2 产品算法理论基础,其形式为:

$$S = s_0(\theta_i, t_s) + s_1(\theta_i, t_s)T_{BV, sur} + s_2(\theta_i, t_s)T_{BH, sur} + s_3(\theta_i, t_s)W \quad (12)$$

其中: S 为海表盐度, $T_{BV, sur}$ 和 $T_{BH, sur}$ 分别为垂直极化和水平极化方向的海表面发射, t_s 为海表温度($^{\circ}\text{C}$), W 为海表面风速(m/s), θ_i 为入射角, 系数 s 是 θ_i 和 t_s 的功能函数。

$$T_{BP, sur} = \frac{T_{BP, ton} - T_{BU}}{\tau} - T_{BP\Omega} \quad (13)$$

其中: P 代表极化(H/V), $T_{BP, ton}$ 为大气顶部亮温; T_{BU} 为大气上行辐射的亮温, $T_{BP\Omega}$ 为大气下行辐射, τ 为大气透射比。

SMOS 卫星 Level 2 产品反演算法是根据贝叶斯定理定义的。在考虑限制条件的情况下, 盐度反演算法权重函数的一般形式为^[4]:

$$\chi^2(P) = \sum_{i=1}^N \frac{[T_{B_i}^{meas} - T_{B_i}^{model}(\theta, P)]^2}{\sigma_i^2} \sum_j \frac{[P_j - P_{jref}]^2}{\sigma_{P_j}^2} \quad (14)$$

其中: i 为 SMOS 卫星测量值个数(不同入射角度 θ); P 为参数矢量 SSS、SST、U 或者有效波高(SWH), SSS 为海表盐度, SST 为海表温度, U 为海表风速, $T_{B_i}^{meas}$ 为卫星观测的海表亮温值, $T_{B_i}^{model}$ 为模型模拟得到的亮温值; P_j 为每个参数的先验值; P_{ref} 为每个参数的参考值; σ_P^2 为参考值期望误差的方差。

3.2 影响因素

海表面盐度卫星遥感的影响因素主要集中在海面和辐射计之间, 具体可以归纳为以下 4 个方面: 太空、电离层、大气和海面^[16]。

3.2.1 太空

来自太空的影响包括银河射电辐射和各种天体辐射(主要是太阳系辐射)。它们主要通过海面和大气反射和散射进入辐射计天线。在卫星遥感时, 还可能有一部分辐射直接进入天线的旁瓣, 这部分辐射通常是恒定的或者缓变的, 大多可以通过公式定量计算进行修正^[7,17]。

银河射电辐射源包括离散的辐射源和宇宙背景辐射。银河系由数以亿计的恒星构成, 并且有很多恒星是极强的辐射源。大多数离散辐射源(除了仙后座 A、天鹅座 A 和蟹状星云)在 L 波段的辐射在

地球表面上的辐射流密度是可以忽略的, 其余 3 个辐射源的辐射流密度是月亮的 1/3^[14,17]。宇宙背景辐射主要集中在银河盘, 最强的辐射源来自于温度为 16 K 的银河系中心, 频率为 1.4 GHz。

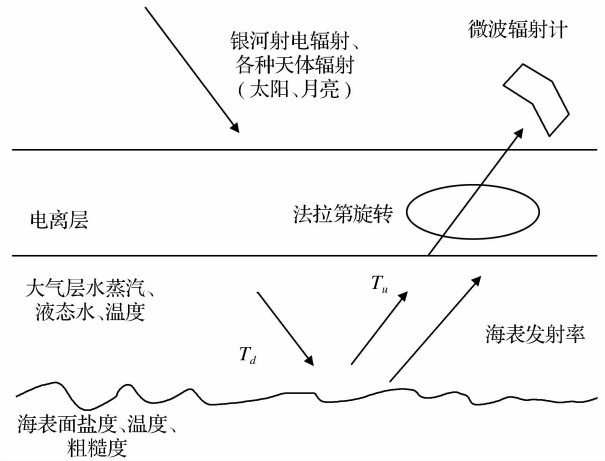


图 1 影响海表微波发射的地球物理输入源

Fig. 1 Geophysical sources that will influence the microwave radiation from sea surfaces

对盐度遥感来说, 太阳在 L 波段是一个极强的辐射源, 从地球上, 太阳圆盘的角展大约是 0.224 deg^2 。在太阳活动周期的高峰期, 它的黑体温度(T_{sun})在 L 波段高达 1 000 万 K。太阳辐射会以两种形式被微波接收器接收: 一种是直接被接收器天线接收, 另一种是通过地球表面反射后进入接收器天线。Yueh 等^[14] 给出了有关的计算公式, 同时考虑了海面反射和散射的作用, 并估算了卫星遥感时可能进入辐射计的太阳辐射的大小。

3.2.2 电离层

对于线性极化测量值来说, 法拉第旋转可以导致几个 K 的误差^[18]。Yueh 等^[14] 认为由于来自地球表面的微波辐射穿过电离层进行传播, 依靠地球磁场和电离层中电子含量, 线性极化场的分量以一个角度 Ω 进行旋转, 在法拉第旋转的影响下, 微波辐射极化是旋转的, 并且通过天线检测到的亮温将与通过 ΔT_B 计算的海表面辐射不一致。

$$\Delta T_B = (T_v - T_h) \sin^2 \Omega - \frac{U}{2} \sin 2\Omega \quad (15)$$

其中: T_v 和 T_h 分别为垂直极化和水平极化海表面辐射亮温; U 为海表面辐射的第三 Stokes 参数。

3.2.3 大气

微波遥感中, 在较低频率的情况下, 大气衰减会很少, 因此由于大气吸收而造成的辐射损失这个权重因数对于微波辐射影响很小^[19]。Yueh 等^[14] 认为

上行辐射、下行辐射和传播损失的经验模型为:

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 T_a + \alpha_2 T_a^2 + bV \quad (16)$$

其中: V 为液态水滴的厚度, 单位是 cm ; T_a 为表面空气温度, 单位是 $^{\circ}\text{C}$; 应用最小均方差准则求出经验模型中的系数。由于水蒸气中的液态水滴的大小比盐度遥感所用 L 波段的波长小几个量级, 所以大气中的水汽、云以及小雨的影响可以忽略^[7,20]。

3.2.4 海面

影响盐度微波遥感的海面因素主要有海面粗糙度、泡沫和海温。海面粗糙度不仅受风的影响, 而且受海表温度等因素的影响。风通过两类效应使微波亮温升高: 一是海面粗糙度的增加; 二是白帽和泡沫的覆盖面积增加。因此风速被选做表征海面粗糙度的参量^[7]。

一般认为风速大于 6 m/s 时海浪开始破碎并形成泡沫, 对发射率有非常大的影响。泡沫的覆盖面积和粗糙度效应不仅与局地风有关, 而且与海气间的温度差异、风的持续时间、风区大小以及观测海域过去时刻的表面波谱有关^[21-22]。

海表粗糙度处理模型主要分为 3 大类^[23]: ① 基于大量卫星遥感和浮标同步测量数据拟合得到的经验模型; ② 基于粗糙海面发射率的电磁波辐射、散射理论的理论模型; ③ 半经验半理论反演算法。由于海面粗糙度对盐度反演的影响很大, 并且存在相互遮阴多次散射问题, 在诸多粗糙度模型中, 双尺度模型、微扰法 SPM (Small Perturbation Method) 和小斜率近似 SSA (Small Slope Approximation) 都可以用来处理相互遮阴多次散射问题, 并且在处理多次散射问题时, 往往综合考虑这几种方法。下面就理论模型和半经验半理论算法进行着重介绍。

$$\begin{bmatrix} T_h(f, \theta_i, \phi_i) \\ T_v(f, \theta_i, \phi_i) \\ T_3(f, \theta_i, \phi_i) \\ T_4(f, \theta_i, \phi_i) \end{bmatrix} = T_s \begin{bmatrix} 1 - |R_{hh}^0(f, \theta_i)|^2 \\ 1 - |R_{vv}^0(f, \theta_i)|^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} k W(k, \phi) \cdot \begin{bmatrix} g_h(f, \theta_i, \phi_i; \epsilon; k, \phi) \\ g_v(f, \theta_i, \phi_i; \epsilon; k, \phi) \\ g_3(f, \theta_i, \phi_i; \epsilon; k, \phi) \\ g_4(f, \theta_i, \phi_i; \epsilon; k, \phi) \end{bmatrix} dk d\phi \quad (21)$$

其中: θ_i 、 ϕ_i 分别为散射波的天顶角和方位角, f 为电磁波的频率; ϵ 为海水的介电常数, T_s 为海表面温度, $W(k, \phi)$ 为海面定向波高波数谱, k 为海表面波数矢量; g_h 和 g_v 分别为根据小斜率近似理论导出的水平和垂直极化权重函数; R_{hh}^0 、 R_{vv}^0 分别为平静海面的水平极化和垂直极化菲涅尔反射系数。

(3) 半经验半理论模型

① Hollinger 半经验模型

Hollinger^[25] 基于测量的数据, 粗糙度对亮温

(1) 双尺度模型

在双尺度模型中, 海表面被模拟为小波浪在大波浪上的叠加, 通过截止波长 λ_c 将海表面粗糙度的尺度分解成小尺度和大尺度: 小尺度是波高比 λ_0 小的波浪; 大尺度是曲率半径比 λ_0 大的波浪。亮温 T_b 公式如下^[10]:

$$T_{b, \text{sea}}(\theta, \phi) = \iint T_{b, l}(\theta, \phi) P(S_x, S_y) \cdot (1 - S_x' \tan \theta) dS_x dS_y \quad (17)$$

其中: 假设 P 为高斯分布, S_x' 和 S_y' 分别是与辐射计方位角的观测方向平行和垂直的表面坡度(斜率); $T_{b, l}$ 为大尺度波的局部亮温。

(2) 直接发射率模型 —— SPM/SSA

Irisov 通过利用微扰法和小斜率近似展开发射率的等价性, 将微扰法得出的小尺度发射率表达式推广到了较平滑的大尺度波动。根据微扰法 (SPM) 可知, 一维的粗糙海表面发射率可以展开为^[23-24]:

$$\xi = \xi_0 + \Delta\xi \quad (18)$$

其中: ξ_0 为平静海面的发射率; $\Delta\xi$ 为由于粗糙度而引起的发射率变化量。

$$\Delta\xi = (k_0 a)^2 g_\gamma(\epsilon, K/k_0, \theta) \quad (19)$$

其中: k_0 为电磁波波长, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$; g_γ 为海表面正弦分量能量的电磁权重函数; ϵ 为海水的介电常数; K 为波数; θ 为入射角。

二维的粗糙度表面发射率可以表示为^[23]:

$$\Delta\xi = 2k_0^2 [W(K) g_\gamma(\epsilon, K/k_0, \theta) dK] \quad (20)$$

其中: $W(K)$ 为二维的海表面波谱。

由于地形关系海表面本身带有一定的倾斜度, 因此微扰法中定义的由小面元组成的粗糙面还带有一定的坡度, 依据海面的小斜率近似 (SSA), 展开至二维的海面全极化辐射亮温的表达式如下^[10,23]:

的贡献可以表示为风速和入射角的线性函数:

$$\Delta T_{Bh} = 0.2 \left(1 + \frac{\theta}{55^\circ} \right) U_{10} \quad (22)$$

$$\Delta T_{Bv} = 0.2 \left(1 - \frac{\theta}{55^\circ} \right) U_{10} \quad (23)$$

其中: θ 为入射角; U_{10} 为风速 ($U_{10} < 3 \text{ m/s}$)。

② WISE 半经验模型

Vall-llossera 等^[26] 提出海表面发射率半经验模型:

$$\Delta T_{Bh} = 0.25 \left(1 + \frac{\theta}{118^\circ} \right) U_{10} \quad (24)$$

$$\Delta T_{Bv} = 0.25 \left(1 - \frac{\theta}{45^\circ} \right) U_{10} \quad (25)$$

$$\Delta T_{Bh} = 1.09 \left(1 + \frac{\theta}{142^\circ} \right) SWH \quad (26)$$

$$\Delta T_{Bv} = 0.92 \left(1 - \frac{\theta}{51^\circ} \right) SWH \quad (27)$$

其中: $3 \text{ m/s} < U_{10} < 12 \text{ m/s}$; SWH(Significant Wave Height) 是有效波高。

③ Gabarró 模型^[27]

$$\Delta T_{Bh} = 0.12 \left(1 + \frac{\theta}{24^\circ} \right) U_{10} + 0.59 \left(1 + \frac{\theta}{50^\circ} \right) SWH \quad (28)$$

$$\Delta T_{Bv} = 0.12 \left(1 - \frac{\theta}{40^\circ} \right) U_{10} + 0.59 \left(1 + \frac{\theta}{50^\circ} \right) SWH \quad (29)$$

其中: $U_{10} > 12 \text{ m/s}$ 。

4 盐度遥感卫星介绍

4.1 Aquarius/SAC-D 卫星计划

Aquarius/SAC-D 卫星是一颗搭载 L 波段主被动联合微波遥感仪器,并且可以在太空中对海洋表面盐度进行观测的卫星。卫星的设计寿命是 3 a,卫星主要的科学目的是进行全球海洋盐度的测定,空间分辨率为 150 km,并且在时间分辨率为 30 d、考虑所有传感器和地球物理学的随机误差和偏差前提下,精度要达到 0.2 psu^[1,28]。

该卫星上最重要的科学探测仪器就是美国研制的“宝瓶座”。它由被动式的 L 频段推扫式微波辐射计和主动式的 L 频段散射计组成,具有辐射分辨率更高、精度与稳定性更好的优点。前者用于测量

海洋表面的微波辐射亮温,工作频率为 1.413 GHz;后者用于测量海洋表面的后向散射,工作频率为 1.26 GHz,也可测量海面粗糙度,对辐射亮温数据进行修正。

Aquarius/SAC-D 卫星的观测数据对于改进用于预测气候变化的模型具有重要意义,科学家应用其数据着手研究气候变化与全球水循环、大洋环流和气候变化的关系。卫星参数和产品描述如表 1~4。

4.2 SMOS 卫星计划

SMOS 卫星基于独特的被动微波干涉成像技术,能够观测大气与海洋、陆地之间的水汽循环,将在观测全球气候变化领域起到关键作用。SMOS 卫星唯一的载荷“基于孔径综合技术的微波成像仪(MIRAS)”是全球第一台采用该技术的星载微波遥感器。SMOS 卫星的任务目的是应用 L 波段的微波辐射计,观测两个从未通过卫星测量的关键参数:土壤湿度和海水盐度。在卫星运转期间,将提供分辨率为 $200 \times 200 \text{ km}$ 的 10~30 d 平均的全球大洋盐度数据,精度预计达到 0.1 psu^[29]。由于 SMOS

表 1 Aquarius 卫星轨道参数

Table 1 Orbital parameters of Aquarius/SAC-D

参数	轨道
高度/km	657 (655~685)
倾角/°	98 (太阳同步轨道)
覆盖率	7 d 全覆盖、103 个轨道
刈幅/km	390

表 2 Aquarius 卫星主要仪器参数

Table 2 Main instrument parameters of Aquarius/SAC-D

参数	频率 /MHz	带宽 /MHz	刈宽 /km	极化	脉冲重复频率 (PRF)/Hz	传输脉冲持续时间/ms	数据传输率 Kbs	脉冲积分时间/ms
辐射计	~1 413	≤26	407	$T_h, T_v, T+45, T-45$	100		11	~9
散射计	1 260	4	373	HH, HV, VV, VH	100	1	2.1	~1.6

表 3 Aquarius 卫星天线参数

Table 3 Antenna parameters of Aquarius/SAC-D

参数	视角 /°	方位角 /°	入射角 /°	射频效率 /%	增益稳定度 /(K,dB)	分辨率 /km	稳定性 /(K,dB)	探测器敏感度 /dB	辐射计敏感度 /(NEDT,K)
辐射计	Beam1	25.8	9.8	28.7	94.0	0.11	94×76	0.12	0.06
	Beam2	33.8	-15.3	37.8	92.4	0.11	120×84	0.12	0.06
	Beam3	40.3	6.5	45.6	90.4	0.11	156×97	0.12	0.06
散射计	Beam1	25.9	9.7	28.8	89.9	0.04	71×58	0.13	0.04
	Beam2	33.9	-15.3	37.9	87.6	0.04	91×56	0.13	0.06
	Beam3	40.3	6.5	45.5	85.4	0.04	122×74	0.13	0.10

表 4 Aquarius 卫星产品描述

Table 4 Product description of Aquarius/SAC-D

数据产品名称	产品描述
L0	未处理的全分辨率的仪器数据/有效载荷数据(原始数据)
L1A	重构的未处理仪器数据;原始辐射计数
L1B	定标、校准后的辐射计、散射计的数据
L2A	在 Level 1 级数据基础上,进行大气校正(修正法拉第旋转、天线辐射图、大气和天空的反射等影响因子)后的数据
L2B	对 Level 2A 数据进行海表盐度(SSS)定标;应用散射计数据修正海面粗糙度后的数据
L3 (Bin)	二进制数据(Bin)由 SeaWiFs、MODIS、OCTS、CZCS、OCM2、VIIRS 和 Aquarius 构成的数据产品
L3 (SMI)	标准图像映射(Standard Mapped Image, SMI)产品是二进制产品的表示形式;从时间和空间上客观的分析了海表盐度(空间分辨率:150 km;时间分辨率:7 d/一个月)

卫星不观测其他的跟盐度遥感相关的数据如海表温度、风速和波高等,所以反演海表面盐度时需要根据

相应信息对这些参数进行估计^[3]。卫星参数和产品描述如表 5、6。

表 5 SMOS 卫星主要参数

Table 5 Main instrument parameters of SMOS

发射时间	2009 年
卫星寿命	最短 3 a
仪器设备	基于孔径综合技术的微波成像仪——MIRAS
仪器介绍	被动微波 2D 干涉仪
波段	L 波段(21 cm~1.4 GHz)
接收器数目/个	69
接受器间距/cm	18.37
极化方式	H & V(可选择的极化模式)
空间分辨率/km	35
倾斜角/°	32.5
辐射分辨率/K	0.8~2.2
角度变化范围/°	0~55
时间分辨率/d	3
仪器数据传输率	89 kbps H & V 极化
轨道	太阳同步轨道,在高度为 758 km 的圆形轨道
功率/W	900

表 6 SMOS 卫星产品描述

Table 6 Product description of SMOS

数据产品名称	产品描述
原始数据	SMOS 原始形式的有效载荷数据,包括仪器现场观测数据和卫星遥感数据 未处理的有效载荷数据(源代码数据包形式数据)
L0	SMOS Level 0 数据产品包括包括:观测数据和校准数据;卫星数据:卫星方位、姿态等数据;仪器/有效载荷内务数据;模式;工程参数(温度、电压、标记近红外光谱等)
L1A	重定格式的、科学校准后的内务数据
L1B	SMOS 观测值的图像重构的输出产品,在天线极化参考系中,由亮温矢量构成,并且包含亮温光谱(SMOS 观测值和傅立叶分量亮温值进行图像重建后的输出数据)
L1C	基于条带形状的亮温值地图
L2A	在 Level 1 级数据基础上,修正大气(修正法拉第旋转、天线辐射图、大气和天空的反射等影响因子)和其他因素的影响、反演盐度和湿度后的数据
L2B	对 L2A 数据进行海表盐度(SSS)定标;应用散射计数据修正海面粗糙度后的数据

5 结 语

本文系统介绍了盐度卫星微波遥感的原理、反演模型、影响因子和在轨运行的两颗卫星,由上述介绍可以知道,卫星遥感海表盐度已经成为海表盐度研究的主要趋势。卫星遥感中,主要是应用微波遥感观测海表面亮温数据,然后进行反演得到海表盐度,在通常的海洋条件下,1.413 GHz 频率上亮温对盐度变化较敏感,而对温度的敏感性较差,该波段应是盐度遥感的首选波段^[30-31]。目前盐度遥感的总趋势是如何应用算法提高盐度遥感的精确度,并达到比较高的空间分辨率^[32-33]。

提高精度一直是 SSS 遥感面临的一个重要问题,要达到 0.1 psu 的分辨率需要亮温的测量精度控制在 0.02~0.07 K^[7]。要达到如此高的精度,对影响海水辐射亮温的因素的研究越来越细,如海面粗糙度、大气电离层的法拉第旋转效应、大气中水汽、太阳等天体的辐射、宇宙背景辐射等^[34-35]。除利用 L 波段微波辐射计测得的亮温进行盐度反演外,还在反演中利用海水的温度、海面的粗糙度等辅助信息^[36-37]。

随着 SMOS 卫星和 Aquarius 卫星相继升空,探测海表盐度的研究已经成为国际遥感研究的热点^[38]。这两颗卫星用来提供全球海水表层盐度的变化观测,从而揭示海洋环流和全球水循环的关系,以及黑潮表层盐度分布特征^[39],帮助人们理解大尺度的盐度变化对全球气候的影响^[40-42]。下一步将会通过航空遥感数据^[43]、海上实测海水 CTD 数据和水槽实验^[44]对卫星数据进行相互校正,以提高盐度遥感的精度,并且在中国近岸海域进行海表面盐度遥感研究。

参考文献 (References):

- [1] Lagerloef G, Colomb F R, LeVine D M, *et al.* The Aquarius/SAC-D Mission; Designed to Meet the Salinity Remote Sensing Challenge[J]. *Oceanography*, 2008, 21(1): 68-81.
- [2] Li Xiuzhen, Liang Wei, Wen Zhiping, *et al.* Preliminary Study on the Salinity Characteristics of South China Sea and Its Response to the Summer Monsoon[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, 30(1): 29-34 [李秀珍, 梁卫, 温之平, 等. 南海盐度对南海夏季风响应的初步分析[J]. *热带海洋学报*, 2011, 30(1): 29-34.]
- [3] Kerr Y H, Waldteufel P, Wigneron J P, *et al.* Soil Moisture Retrieval from Space; The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) Mission[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(8): 1729-1735.
- [4] Gabarró C. Study of Salinity Retrieval Errors for the SMOS Mission[D]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2004.
- [5] Yin Xiaobin, Liu Yuguang, Wang Zhenzhan, *et al.* Inversion Technique of Remote Sensing Sea Surface Salinity and Temperature by Microwave Radiometer[J]. *Science in China (series D)*, 2006, 36(10): 968-976. [殷晓斌, 刘玉光, 王振占, 等. 一种用于微波辐射计遥感海表面盐度和温度的反演算法[J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2006, 36(10): 968-976.]
- [6] Chai Ziwei. Utilizing SAR Imagery to Measure Sea Surface Salinity on Pear River Estuary[D]. Guangzhou: Zhongshan University, 2008. [柴子为. 基于星载雷达的海表面盐度的遥感反演研究——以珠江口为例[D]. 广州: 中山大学, 2008.]
- [7] Wang Jie, Jiao Yutian, Cao Yong, *et al.* Advances on Ocean Salinity Remote Sensing [J]. *Ocean Technology*, 2006, 36(10): 968-976. [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, 36(10): 968-976.]
- [8] Yang Binli. The Active/Passive Remote Sensing System for Measuring Ocean Salinity[J]. *Space Electronic Technology*, 2010, 2: 49-54. [杨斌利. 用于海洋盐度观测的主被动联合遥感系统[J]. *空间电子技术*, 2010, 2: 49-54.]
- [9] Li Zhi. The Study of Sea Surface Salinity Retrieval Model at L-band[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008. [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.]
- [10] Spurgeon P, Lavender S, Delwart S. SMOS L2 OS Algorithm Theoretical Baseline Document [J/OL]. http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/SO-TN-ARG-GS-0007_L2OS-ATBD_v3.5_10069.pdf. 2010-09.
- [11] Li Zhi, Wei Enbo, Tian Jiwei. A New Empirical Model for retrieving Sea Surface Salinity in L-band[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(5): 3028-3030. [李志, 魏恩泊, 田纪伟. 一个 L 波段海表盐度遥感反演的经验模式[J]. *物理学报*, 2007, 56(5): 3028-3030.]
- [12] Klein L A, 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.
- [13] Li Qingxia, Zhang Jing, Guo Wei, *et al.* Overview on Ocean Salinity Remote Sensing by Microwave Radiometer[J]. *Ocean Technology*, 2007, 26(3): 58-63. [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.]
- [14] Yueh S H, West R, Wilson W, *et al.* Error Sources and Feasibility for Microwave Remote Sensing of Ocean Surface Salinity[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(5): 1049-1060.
- [15] Wentz F, LeVine D M. Algorithm Theoretical Basis Document; Aquarius Level-2 Radiometer Algorithm; Revision 1 [R]. USA: RSS Technical Report 012208, 2008: 1-14.
- [16] Wang Jie. The Algorithm and Influencing Factors of Ocean Salinity by Microwave Remote Sensing [D]. Qingdao: The

- First Institute of Oceanography, SOA, 2007. [王杰. 微波遥感海水盐度的算法和影响因素分析[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2007.]
- [17] LeVine D M, Abraham S. Galactic Noise and Passive Microwave Remote Sensing from Space at L-band[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(1): 119-129.
- [18] LeVine D M, Abraham S. The Effect of the Ionosphere on Remote Sensing of Sea Surface Salinity from Space[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(4): 771-782.
- [19] Rosenkranz P W. Water Vapor Microwave Continuum Absorption: A Comparison of Measurements and Models[J]. *Radio Science*, 1998, 33(4): 919-928.
- [20] Lerner R M, Hollinger J P. Analysis of 1.4 GHz Radiometric Measurements from Skylab[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1977, 6(4): 251-269.
- [21] Durden S, Vesecky J. A Physical Radar Cross-section Model for a Wind-driven Sea with Swell[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1985, OE-10(4): 445-451.
- [22] Yueh S H. Modeling of Wind Direction Signals in Polarimetric Sea Surface Brightness Temperatures[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society*, 1997, 35(6): 1400-1418.
- [23] Yin Xiaobin. A Study on the Passive Microwave Remote Sensing of Sea Surface Wind Vector, Temperature and Salinity and the Effect of Wind on Remote Sensing of Temperature and Salinity[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007. [殷晓斌. 海面风矢量、温度和盐度的被动微波遥感及风对温盐遥感的影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.]
- [24] Reul N, Chapron B. SMOS Salinity Data Processing Study Improvements in Emissivity Models[R]. France: CLS/IFREMER/NERSC/WP 1100 Report, 2001: 37-87.
- [25] Hollinger J P. Passive Microwave Measurements of Sea Surface Roughness[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 1971, GE-9(3): 165-169.
- [26] Vall-Houssera M, Miranda J, Camps A, *et al.* Sea Surface Emissivity Modeling at L-band: An Inter-comparison Study[R]. France: WISE/LOSAC/EUROSTARRS Campaigns Workshop, 2003: 143-153.
- [27] Gabarró C, Font J, Cames A, *et al.* Retrieved Sea Surface Salinity and Wind Speed from L-band Measurements for WISE and EuroSTARRS Campaigns[R]. WISE/LOSAC/EuroSTARRS Campaigns Workshop, ESA SP-525, 2003, 163-171.
- [28] Dinnat E, LeVine D M. Impact of Sunlight on Salinity Remote Sensing: An Example with the Aquarius Radiometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3137-3150.
- [29] Petitcolin F, Waldteufel P, Vergely J. Final Report of the Study 'Soil Moisture Retrieval for SMOS Mission', CCN2 For Sea Surface Salinity Retrieval[R]. European Space Agency ESTEC Contract 16027/02/NL/GS, SMOS-TN-ACR-LOD-006, 2003.
- [30] Shi Jiuxin, Zhu Dayong, Zhao Jinping, *et al.* Theoretic Analysis on the Retrieval Precision of Ocean Salinity Remote Sensing[J]. *High Technology Letters*, 2004, 14(7): 101-105. [史久新, 朱大勇, 赵进平, 等. 海水盐度遥感反演精度的理论分析[J]. *高技术通讯*, 2004, 14(7): 101-105.]
- [31] Lagerloef G, Swift C T, LeVine D M. Surface Salinity: The Next Remote Sensing Challenge[J]. *Oceanography*, 1995, 8(2): 44-50.
- [32] Zine S, Boutin J, Waldteufel P, *et al.* Issues about Retrieving Sea Surface Salinity in Coastal Areas from SMOS Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(7): 2061-2072.
- [33] Yin Xiaobin, Liu Yuguang, Zhang Hande, *et al.* Microwave Remote Sensing of Sea Surface Salinity—A Study on Microwave Radiation Theory of Calm Sea Surface[J]. *High Technology Letters*, 2005, 15(8): 86-90. [殷晓斌, 刘玉光, 张汉德, 等. 海表面盐度的微波遥感——平静海面的微波辐射机理研究[J]. *高技术通讯*, 2005, 15(8): 86-90.]
- [34] Skou N, Hoffman-Bang D. L-band Radiometers Measuring Salinity from Space Atmosphere Propagation Effects[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(10): 2210-2217.
- [35] Pellarin T, Wigneron J, Calvet J, *et al.* Two-year Global Simulation of L-band Brightness Temperatures over Land[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(9): 2135-2139.
- [36] Wilson W J, Yush S H, Dinardo S J, *et al.* Passive Active L- and S-band (PALs) Microwave Sensor for Ocean Salinity and Soil Moisture Measurements[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39: 1039-1048.
- [37] Talone M. Contribution to the Improvement of the Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) Mission Sea Surface Salinity Retrieval Algorithm [D]. Spain: Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2010: 21-35.
- [38] Zhao Kai, Shi Jiuxin, Zhang Hande. High Sensitivity Airborne L-band Microwave Radiometer Measurements of Sea Surface Salinity[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(2): 277-283. [赵凯, 史久新, 张汉德. 高灵敏度机载 L 波段微波辐射计探测海表盐度[J]. *遥感学报*, 2008, 12(2): 277-283.]
- [39] Ren Huiru, Kang Jiancheng, Li Weijiang, *et al.* Surface Salinity Distribution of the Kuroshio in the East China Sea and Its Influencing Factors[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, 30(5): 55-61 [任惠茹, 康建成, 李卫江, 等. 东海黑潮表层盐度分布特征及其影响因素[J]. *热带海洋学报*, 2011, 30(5): 55-61.]
- [40] Wang Yonghong, Heron M L, Ridd P. Progress in Measuring Sea Surface Salinity by Using Airborne Microwave Remote Sensing System[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(1): 139-145. [王永红, Heron M L, Ridd P. 航空微波遥感观测海水表层盐度的研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(1): 139-145.]
- [41] Lazure P, Jégou A, Kerdreux M. Analysis of Salinity Meas-

urements Near Islands on the French Continental Shelf of the Bay of Biscay[J]. *Scientia Marina*, 2006, 70(1): 7-14.

[42] Zine S, Boutin J, Waldteufel P, *et al.* Issues about Retrieving Sea Surface Salinity in Coastal Areas from SMOS Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(7): 2061-2072.

[43] Chen Biao, Yu Zhentao, Song Rugang. Atmospheric Propagation Effects Simulation on Sea Surface Salinity Remote Sens-

ing[J]. *Ocean Technology*, 2009, 28(4): 68-71. [陈标, 于振涛, 宋汝刚. 海面盐度卫星遥感的大气影响仿真[J]. *海洋技术*, 2009, 28(4): 68-71.]

[44] Lu Zhaoshi, Shi Jiuxin, Jiao Yutian, *et al.* Experimental Study of Microwave Remote Sensing of Sea Surface Salinity[J]. *Ocean Technology*, 2006, 25(3): 70-76. [陆兆弢, 史久新, 矫玉田, 等. 微波辐射计遥感海水盐度的水池实验研究[J]. *海洋技术*, 2006, 25(3): 70-76.]

Progress in SSS (Sea Surface Salinity) Microwave Remote Sensing by Satellite

Wang Xinxin^{1,2}, Zhao Dongzhi², Yang Jianhong², Wang Xiang^{1,2}

(1. *College of Environmental Science and Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;*

2. *National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China*)

Abstract: The SSS (Sea Surface Salinity) is the important parameter of study ocean circulation and global climate and factors which determine the essential properties of seawater. Satellite microwave remote sensing satisfies the salinity research needs of extensiveness and continuous observations. International chose L-band, with a central frequency of 1.413 GHz is the band of the first choice for salinity remote sensing. At the moment, there are two main inversion algorithms of SSS remote sensing by microwave oversea: Algorithm of estimate SSS with sea surface emissivity and inversion algorithm based on Bayesian. Main factors affecting the accuracy of the salinity inversion are Space radiation, Faraday rotation in ionized layer, atmospheric and sea surface roughness, and the surface roughness have a great impact on the salinity inversion. The surface roughness model can be divided into three categories: theoretical algorithm, empirical algorithm, semiempirical algorithm. Because Aquarius/SAC-D satellite and SMOS satellite were successfully launched, salinity can be retrieved with an accuracy of 0.2 psu by the two satellites, the inversion accuracy is expected to be higher by improving the inversion algorithm.

Key words: SSS; Brightness temperature; Surface emissivity; Microwave remote sensing; Retrieval algorithm