

## 卫星盐度计海表盐度反演技术

吴彬锋<sup>1,2</sup>, 王丛丛<sup>3</sup>, 林明森<sup>1</sup>, 张有广<sup>1</sup>

(1. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081;  
3. 中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 采用分步反演、联合反演和线性回归的方法, 分别实现海表盐度的反演。反演结果表明, 分步反演可以及时发现和修正误差较大的参数, 联合反演的精度最好, 线性回归算法反演拥有最快的速度。在实际应用中, 可以按需选择。

**关键词:** 海表盐度; 卫星微波遥感; L波段; 反演

**中图分类号:** P731.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2017)02-0080-08

### 1 引言

海表面盐度(Sea Surface Salinity, SSS)是海洋-气候系统中最重要参量之一<sup>[1]</sup>, 是认识海洋、揭示海洋现象必不可少的要素, 在气候预报、灾害监测、全球水循环、海洋生态、海冰和水团监测以及军事等领域中起着重要的作用。使用传统的观测手段获取海表盐度信息非常不便, 遥感是更为方便有效的获取SSS的方式, 而卫星微波遥感更是目前唯一可行的大范围、连续观测的方法<sup>[2-3]</sup>。欧洲航天局(European Space Agency, ESA)的SMOS(Soil Moisture and Ocean Salinity)卫星(2009)和美国等多国宇航局共同开发的Aquarius/SAC-D卫星(2011)都已相继升空, 并陆续发布了数据产品。

2015年伊始, 我国第一个用于海洋盐度反演的卫星项目——“海洋盐度探测卫星”工程启动。除了1.41 GHz的辐射计外, “海洋盐度探测卫星”还将拥有6.7 GHz、18.7 GHz和23.8 GHz的辐射计以及1.26 GHz的散射计。它将稳定提供全球海洋盐度数据, 完善我国自主的海洋动力环境信息获取能力, 提升对海洋环境监测和预报的精度。为了充分利用盐度卫星各频段载荷的观测数据, 降低海

表盐度反演中误差的引入, 本文根据多波段遥感数据, 分别利用分步反演、联合反演和线性回归的算法仿真反演海表盐度, 并分析不同算法的反演精度。

### 2 模式及方法

多波段数据反演海表盐度的主要思路是: 首先根据L波段散射计测量的数据反演海表风速信息, 然后根据3种不同方法反演温度和盐度信息。分步反演方法是利用C/K波段辐射计测量的数据反演海表温度信息, 再将风速和温度信息带入盐度反演模型反演得到海表盐度信息, 最后将海表盐度信息作为原先的风速、温度信息反演的输入参数进行迭代循环, 直到反演结果稳定。联合反演方法是利用C/K/L 3个波段的信息进行联合反演, 直到结果稳定。线性回归的方法是利用C/K波段反演得到的温度、风速信息作为初始值进行盐度反演。海表盐度的反演流程图见图1。

L波段海表风场反演模型主要参考美国Aquarius卫星和日本PALSAR卫星L波段散射计反演海表风速的模型<sup>[4]</sup>。

L波段后向散射系数表示如下:

收稿日期: 2016-03-17; 修回日期: 2016-05-25。

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2013AA09A505)。

作者简介: 吴彬锋(1987-), 男, 硕士在读, 从事卫星盐度计海表盐度反演研究。E-mail: wbfjqm@sohu.com



同作用产生的。

$$T_{B\_sea}(\theta, \Phi) = \iint T_{B\_l}(\theta, \Phi) P(S_x, S_y) (1 - S'_x \tan \theta) dS'_x dS'_y \quad (9)$$

式中:  $S_x$ 、 $S_y$  分别为逆风和侧风方向的表面坡度,  $dS'_x$  和  $dS'_y$  分别表示沿着和垂直辐射计观测方向的坡度,  $P(S_x, S_y)$  为大尺度波表面坡度的概率密度函数,  $T_{B\_l}$  为大尺度波的局部亮温, 表示为:

$$T_{B\_l}(\theta_i, \Phi_i) = T_s (1 - R_{ss}(\theta_i, \Phi_i)) \quad (10)$$

式中:  $R_{ss} = R_c + R_i$  表示小尺度波的反射率。  $R_i$  代表非相关部分, 可以通过 Rice 的一阶微扰理论<sup>[9]</sup>求得;  $R_c$  代表相关部分, 可以通过 Yueh 等的二阶微扰理论求得。

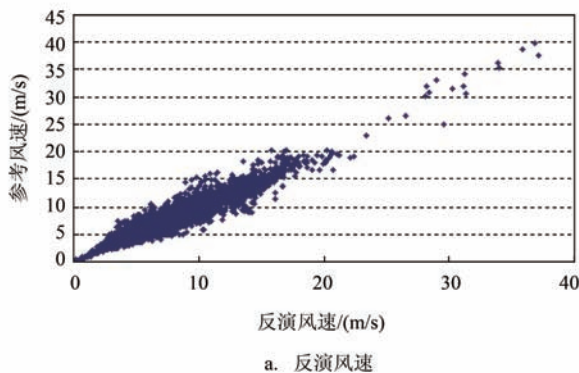
双尺度模型计算非常复杂, 因此可以将粗糙度对亮温的贡献  $\Delta T_{B\_rough}$  分解为全方向信号和一次、二次谐波的和:

$$\Delta T_{B\_rough} = \begin{bmatrix} T_H \\ T_V \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{H0} + T_{H1} \cos(\Phi_a) + T_{H2} \cos(2\Phi_a) \\ T_{V0} + T_{V1} \cos(\Phi_a) + T_{V2} \cos(2\Phi_a) \\ U_1 \sin(\Phi_a) + U_2 \sin(2\Phi_a) \\ V_1 \sin(\Phi_a) + V_2 \sin(2\Phi_a) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中:  $\Phi_a$  为风向  $\Phi_w$  和辐射计观测方向  $\Phi_r$  的夹角,  $\Phi_a = \Phi_w - \Phi_r$ ;  $T_H$ 、 $T_V$  分别代表水平和垂直极化亮温,  $T_3$ 、 $T_4$  分别为第三、第四斯托克斯参数; 其余参数为入射角  $\theta$ 、海面温度  $T_s$ 、盐度  $S$  和风速  $V$  的函数<sup>[10]</sup>。

### 3 试验和结果

本文数据来源为 Windsat 和 PSAL 全球月平均



数据, 利用正向模型仿真生成 C、K、L 波段辐射计亮温, 在此基础上分别添加不同噪音生成仿真测量数据。为了更直观的了解海表盐度反演的误差与不同反演方法的关系, 仿真反演中 C、K 波段模拟亮温添加的高斯噪音标准差均为 0.5 K, L 波段模拟亮温添加的高斯噪音标准差为 2.5 K。

#### 3.1 海面风场的反演

根据 L 波段散射计系统设计参数和卫星平台参数, 构建仿真系统, 生成 L 波段散射计后向散射系数模拟数据, 然后利用模拟数据进行风场反演实验, 并对反演误差进行评估。

表 1 L 波段散射计滤波前后风矢量反演误差统计

误差统计量	误差大小
风速平均误差(m/s)	-0.024 5 m/s
风速平均绝对误差(m/s)	0.791 1 m/s
风速均方根误差(m/s)	1.086 8 m/s
风向平均误差(°)	1.523 6°
风向平均绝对误差(°)	23.789 6°
风向均方根误差(°)	34.991 1°

反演的风速均方根误差为 1.086 8 m/s, 风向均方根误差为 34.991 1°, 结果表明, 在当前参数条件下风速反演误差较小。但是由于当前设计的 L 波段散射计只进行前向扫描, 对于同一分辨单元其入射角和方位角都很单一, 而且 HH 和 VV 极化具有相同的几何观测参数, 导致不能由观测数据同时独立反演出风速和风向, 而必须依赖于 NWP 等外部风向信息进行辅助反演。

#### 3.2 海表温度的反演

海表温度的反演采用 C/K 分步反演、C/K 联合

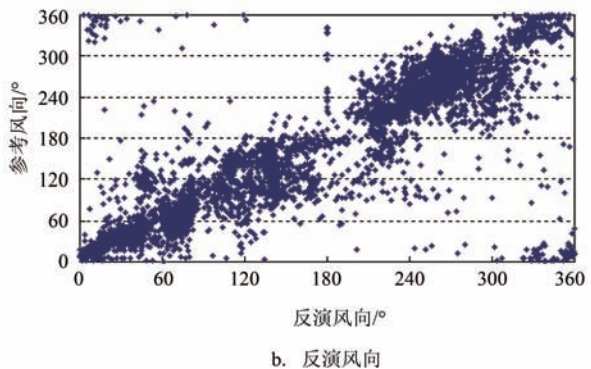


图 2 L 波段海表风场反演



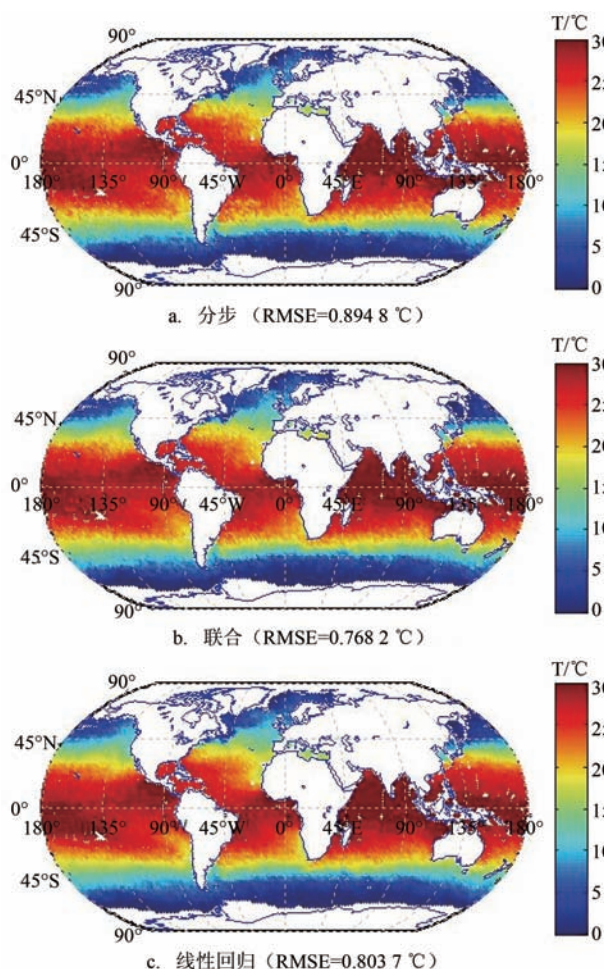


图3 海表温度反演

反演和线性回归算法这3种方法。

C/K分步反演海面温度时,先利用K波段亮温数据反演风速信息,然后将风速信息代入C波段亮温辐射传输模型反演海表温度,反演得到的温度信息又可以代回K波段辐射传输模型反演风速信息,如此迭代循环直到稳定。C、K波段模拟亮温添加的高斯噪音标准差均为0.5 K,海表风速、海表温度和海表盐度的先验误差分别为2 m/s, 1.5 K, 0.5 psu。

C/K联合反演海表温度即采用C/K波段多参数联合反演海表温度和风速。参数设置和C/K分步反演海表温度相同。

线性回归算法反演海表温度时不需要风速和温度的初始值,参数设置与前两种方法相同。

结果显示(见图3),C/K分步反演海表温度的误差为0.894 8 °C, C/K联合反演海表温度的误差为0.768 2 °C, 线性回归算法反演海表温度的误差为

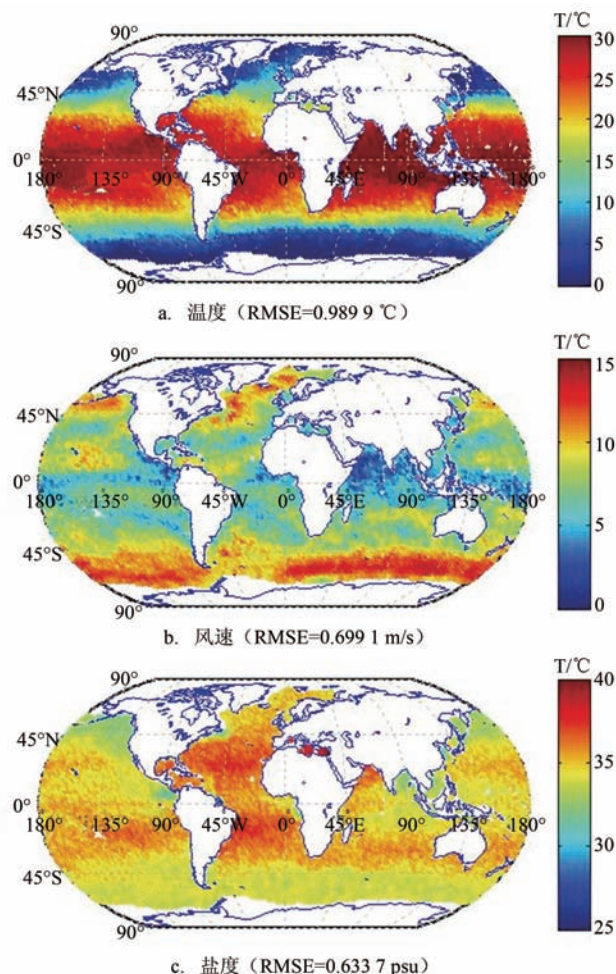


图4 分步算法反演海表面信息

0.803 7 °C, 联合反演的结果较优。

### 3.3 海表盐度的反演

海表盐度的反演采用分步反演、C/K/L联合反演和线性回归算法这3种方法。

利用模拟值添加随机高斯噪音的方法,模拟生成一维C/K波段综合孔径微波辐射计单角度观测数据和二维L波段综合孔径微波辐射计多角度观测数据,然后反演风速、温度和盐度。仿真反演中C/K波段的人射角为55°,模拟亮温添加的高斯噪音标准差均为0.5 K; L波段的人射角为15°~65°,模拟亮温添加的高斯噪音标准差为2.5 K,海表风速、海表温度和海表盐度的先验误差分别为2 m/s, 1.5 K, 0.5 psu。反演结果如下:

根据分步反演、联合反演和线性回归算法反演海表盐度的结果,3种方法的误差对比见表2。



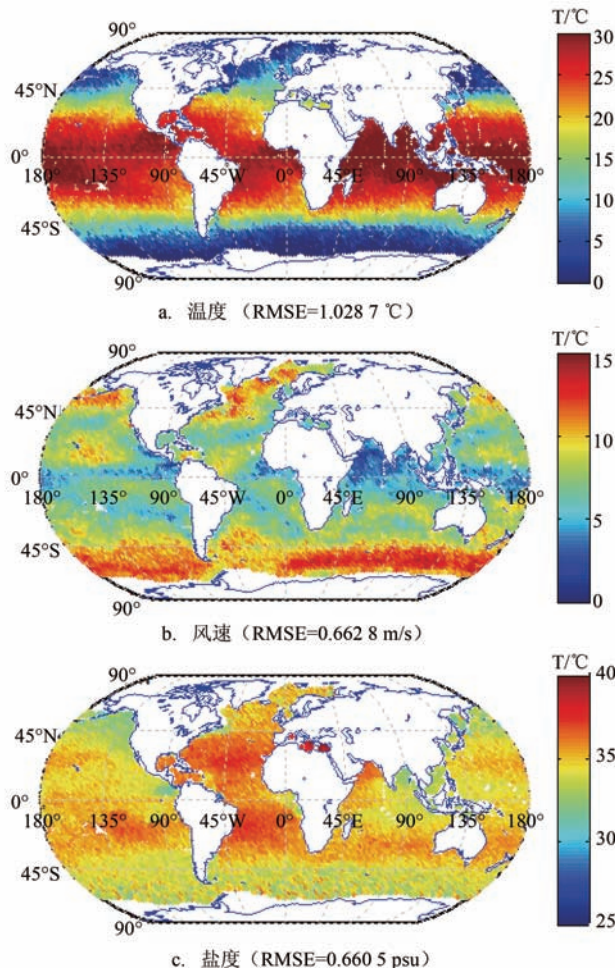


图5 联合算法反演海表面信息

表2 3种方法反演的温度、风速和盐度误差对比

反演方法	分步反演	联合反演	线性回归
温度平均误差/K	-0.008 6	-0.025 9	1.660 2e-23
温度平均绝对误差/K	0.705 1	0.777 4	0.632 1
温度均方根误差/K	0.989 9	1.028 7	0.803 7
风速平均误差/(m/s)	-0.041 3	-0.012 2	-7.922 2e-14
风速平均绝对误差/(m/s)	0.489 6	0.544 1	0.721 1
风速均方根误差/(m/s)	0.699 1	0.662 8	0.902 2
盐度平均误差/psu	-0.023 0	-0.027 7	0.003 2
盐度平均绝对误差/psu	0.453 3	0.457 3	0.482 1
盐度均方根误差/psu	0.633 7	0.660 5	0.679 1

分步反演、联合反演、线性回归算法反演的盐度均方根误差分别为0.633 7 psu, 0.660 5 psu, 0.679 1 psu。对比反演结果可知, 分步反演的结果最优, 联合反演和线性回归算法的结果稍差。线性回归算法的运算速度要快许多, 但是盐度反演的精度相对较

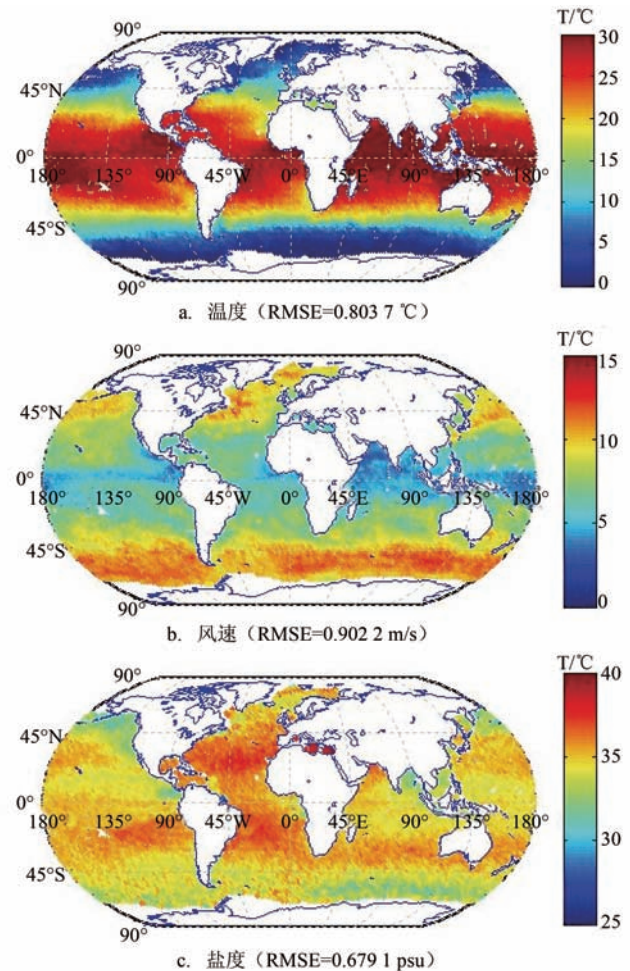


图6 线性回归算法反演海表面信息

低。联合反演中由于L波段对温度和风速的敏感性相对较差, 但多角度观测的数据量又远大于C/K波段, 因此当L波段的亮温参与了温度和风速的反演时就减弱了C/K波段的作用, 造成反演精度的下降。为了验证该分析的正确性, 可以改变L波段在联合反演中的权重, 观察反演后的精度变化。

改变代价函数中L波段的贡献权重, 在范围为0~1之间择点选取, 其余初始参量同上。部分反演结果如下:

从结果中可以看出, 改变L波段亮温在代价函数中权重后, 温度、风速和盐度的联合反演精度都有所改变。降低L波段亮温在代价函数中的权重使其在联合反演中的作用减弱, C/K波段亮温的作用增强, 温度、风速和盐度的反演精度都得到提高。

L波段亮温贡献在不同权重时联合反演的温度、风速和盐度的误差对比见表3。



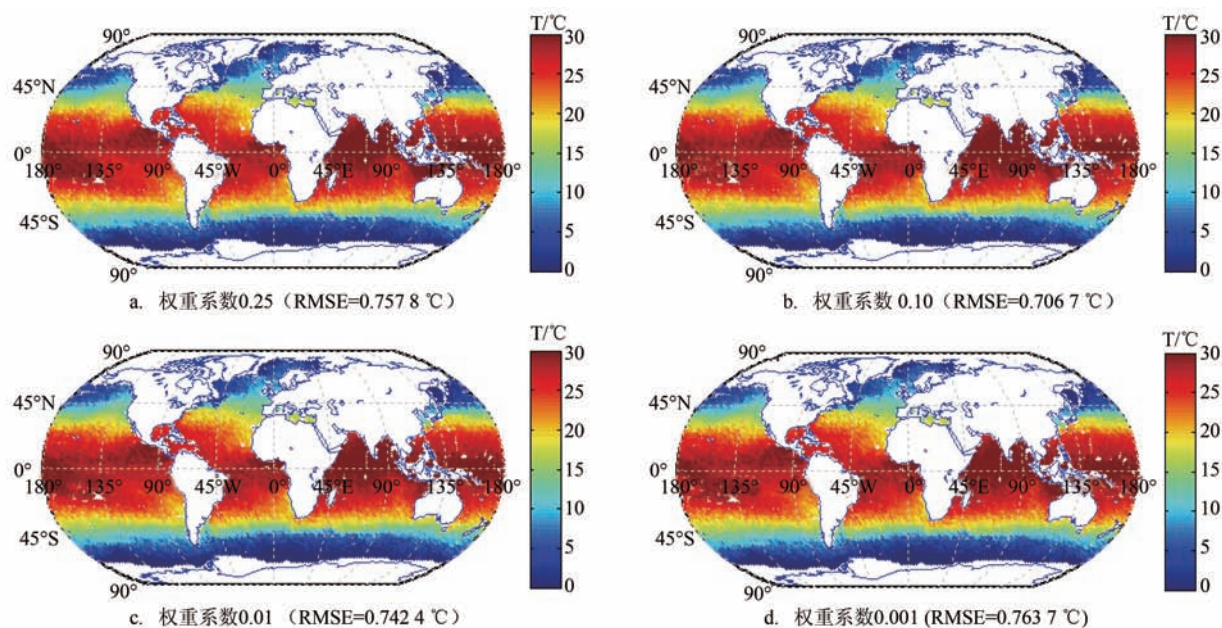


图7 改变权重后温度的反演结果

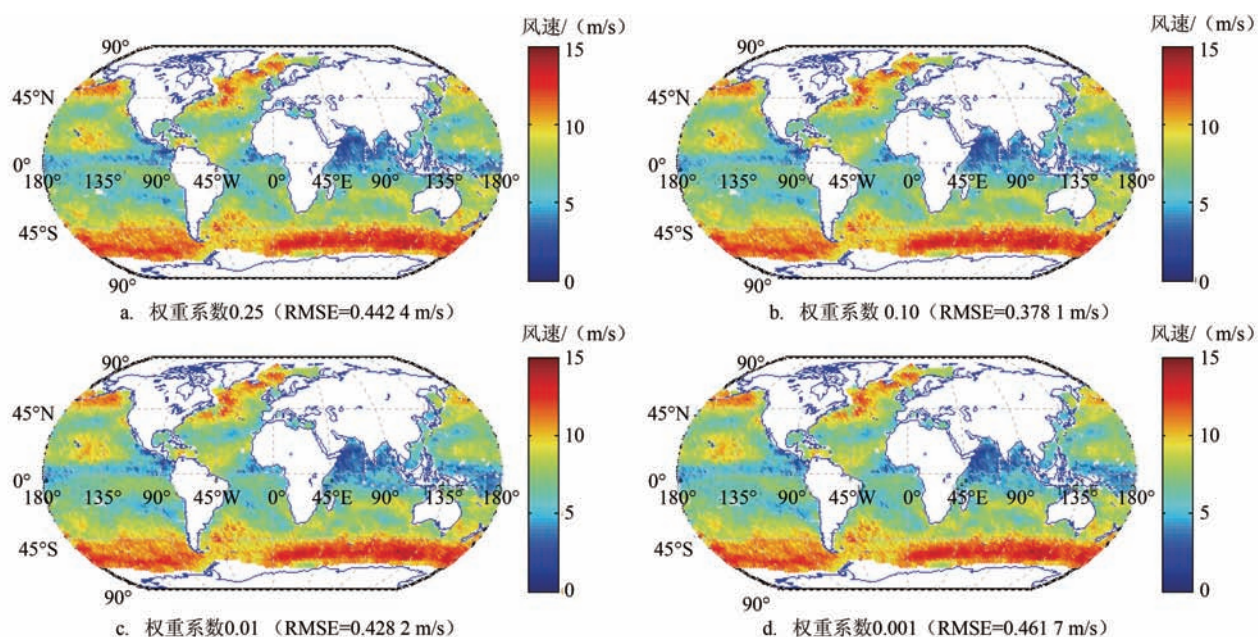


图8 改变权重后风速的反演结果

设置权重之后,温度、风速和盐度的联合反演精度随L波段亮温贡献权重的下降而升高,验证了之前的结论。温度、风速和盐度的反演误差随L波段亮温贡献的权重变化如下图所示:

根据上图的结果,当L波段亮温贡献权重在合适范围时,由于L波段亮温贡献权重占比下降,C/K

波段亮温贡献权重提升,同时L波段的多角度信息对温度和风速的反演起到了辅助的作用,温度和风速反演精度得到提高,盐度的反演精度也略微提高。当L波段亮温贡献权重在0.25~0.05之间时,盐度的反演精度最高。当L波段亮温贡献权重在0.1~0.05之间时,温度和风速反演精度最高。当L

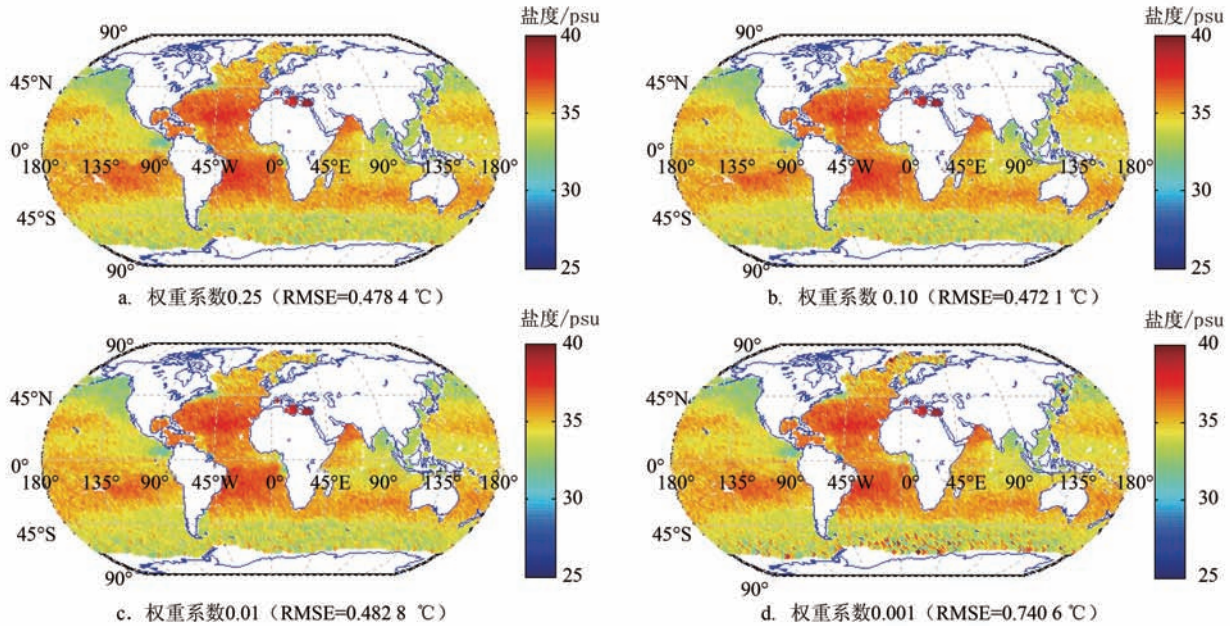


图9 改变权重后盐度的反演结果

表3 不同权重时联合反演的温度、风速和盐度误差对比

反演方法 L波段权重	均方根误差		
	温度/K	风速/(m/s)	盐度/psu
0.5	0.869 5	0.550 7	0.567 9
0.3	0.764 8	0.457 3	0.492 8
0.25	0.757 8	0.442 4	0.478 4
0.2	0.730 9	0.446 2	0.490 1
0.15	0.721 2	0.400 5	0.473 7
0.1	0.706 7	0.378 1	0.472 8
0.05	0.705 7	0.371 4	0.473 0
0.03	0.716 3	0.386 8	0.475 5
0.01	0.742 4	0.428 2	0.482 8
0.005	0.752 9	0.445 2	0.491 8
0.003	0.756 8	0.452 5	0.524 9
0.001	0.763 7	0.461 7	0.740 6

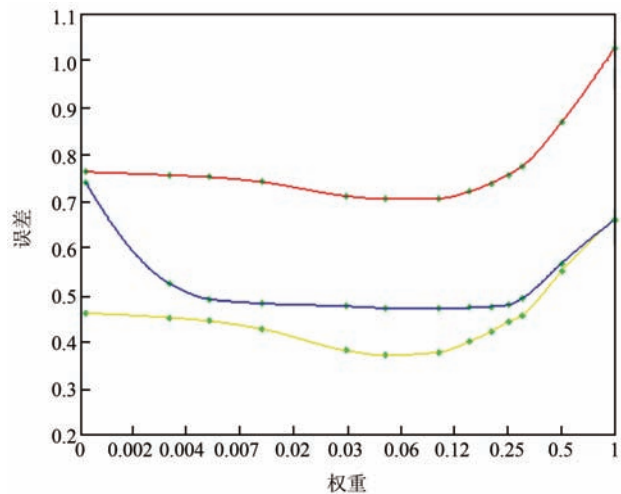


图10 温度(红)、风速(黄)和盐度(蓝)反演精度随L波段贡献权重变化

波段亮温贡献权重低至0.01时,温度、风速和盐度反演的精度开始下降,这是由于C/K波段对盐度不敏感,L波段占比过低就造成了盐度反演精度下降,继而影响到温度和风速的反演精度。

#### 4 结论

本文中,海表盐度反演的主要思想是先利用L

波段散射计数据反演海表风速,再利用C/K波段辐射计数据反演海表温度,然后将反演得到的风速和温度信息以及L波段辐射计数据带入盐度反演模型反演海表盐度,反演得到的盐度信息又可以作为风速和温度反演时的输入参数,如此迭代循环直到反演结果稳定。由于仿真数据添加了较大的噪音偏差,因此反演误差也较大。

风场反演的仿真结果表明,当前设定参数下风



速反演误差较小,但是由于L波段散射计设计的原因,风向的反演误差较大,因此不能同时独立反演出风速和风向,必须依赖外部风向信息作为辅助。海面温度的仿真结果表明,C/K波段联合反演输出温度的精度较高,因此在温度的反演中选取C/K波段联合反演较为适宜。

通过仿真分析,将盐度分步反演结果与3个参量联合反演结果进行了比较。结果表明:L波段为多角度观测,C/K波段为单角度观测,分步反演结果优于联合反演结果;在联合反演的代价函数中对L波段贡献设置权重时,温度、风速反演精度随权重下降而提高,盐度反演精度一定范围内随权重下降而提高,当权重小到一定程度后,温度、风速和盐度反演精度变差;采用线性回归的分步反演算法运算速度快,温度反演精度与其它两种反演算法精度相当,但是风速和盐度精度相比略低。

由此可知,分步反演算法的优势是可以逐步反演各参数,对于存在误差较大的参数能够及时发现和修正,可以优化下次循环时输入参量的数据质量,改进反演精度。联合反演的优势是反演精度高,但需要调整代价函数。线性回归算法的优势是反演速度快。因此,在海面参量反演过程中,可以按需选择反演方式。

在实际应用中,为提高反演精度,可以先利用线性回归算法反演出温度及风速信息,作为分步反演算法或联合反演算法的初始值,然后再利用分步

反演算法或联合反演算法反演海表盐度。

## 参考文献

- [1] Martin S. 海洋遥感导论[M]. 蒋兴伟, 译. 北京: 海洋出版社, 2008: 342.
- [2] 林明森, 张有广, 袁欣哲. 海洋遥感卫星发展历程与趋势展望[J]. 海洋学报, 2015, 37(1): 1-10.
- [3] 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.
- [4] Yueh S H, Tang W Q, Fore A G, et al. L-band 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.
- [5] Wentz F J, Meissner T, Smith D K. Assessment of the initial release of WindSat wind retrievals[R]. RSS Technical Report 010605, 2005.
- [6] 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.
- [7] 王丛丛. 海洋盐度的主被动微波遥感探测技术研究[J]. 空间电子技术, 2015, 12(4): 19-23.
- [8] Yueh H A, Shin R T, Kong J A. Scattering of electromagnetic waves from a periodic surface with random roughness[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64(4): 1657-1670.
- [9] Rice S O. Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 1951, 4(2-3): 351-378.
- [10] Yueh S H, Chaubell J. Sea surface salinity and wind retrieval using combined passive and active L-band microwave observations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(4): 1022-1032.

## Sea surface salinity retrieval using satellite microwave observations

WU Bin-feng<sup>1,2</sup>, WANG Cong-cong<sup>3</sup>, LIN Ming-sen<sup>1</sup>, ZHANG You-guang<sup>1</sup>

(1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081 China; 2. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China; 3. AST-Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100 China)

**Abstract:** By using stepwise retrieval, coordinated retrieval or linear regression method, the sea surface salinity is inverted, respectively. The results show that the stepwise retrieval method can find and update parameter in time. The coordinated retrieval method is the best in accuracy while the linear regression method is the fastest. We can make choice according to our requirements in practice.

**Key words:** sea surface salinity; satellite microwave remote sensing; L-band; retrieval