

粗糙海面 L 和 C 双波段的代价函数多参量遥感反演分析

齐震^{1,2}, 魏恩泊¹, 刘淑波^{1,2}

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 利用代价函数(cost function)方法, 通过分析粗糙海面 L 和 C 双波段多极化遥感亮温对海表盐度、温度、风速和有效波高等参数的敏感性以及 L 和 C 双波段多极化的代价函数收敛特性, 建立了反演海表盐度、温度、风速和有效波高等多参数的 L 和 C 双波段多极化代价函数模式。双波段遥感模式分析结果表明: (1)对于双参数的联合反演, L 和 C 双波段垂直极化代价函数联合反演海表盐度和温度可以获得较好的反演结果。(2)L 波段垂直极化和 C 波段水平极化代价函数联合反演海表盐度和风速较好。(3)对于三参数联合反演, L 波段垂直极化和 C 波段的双极化联合反演盐度、温度和风速的精度较高。(4)L 波段亮温对有效波高的敏感性较低(C 波段经验模式不含有效波高), 使得有效波高反演误差较大, L 和 C 波段经验模式不适合反演有效波高参数。另外, 为了定量分析 L 和 C 双波段代价函数的多参量遥感反演结果, 采用加性噪音模拟亮温方法, 对上述 L 和 C 双波段多极化模式的盐度、温度和风速等多参数联合反演误差进行了分析, 均得出较好的结果。结论表明 L 和 C 双波段代价函数联合反演多参量可以明显提高参量反演精度, 为粗糙海表面多参量的反演提供了新的方法和途径。

关键词: 粗糙海面; 代价函数; 海表盐度; 亮温; L 和 C 双波段

中图分类号: P773.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2012)01-0100-08

研究海表面盐度的分布和变化规律对了解海洋热盐环流以及海洋-大气系统相互作用有重要意义。为了获得大范围时空连续的海面盐度观测资料, 发展盐度微波遥感是实现这一目标的重要手段。自 20 世纪 70 年代, 国际上开展了大量盐度遥感的理论研究^[1-3], 并证实了实现盐度遥感是可行的, 例如: 航空实验已经证实了使用 L 波段(1.4 GHz)微波辐射计可进行盐度遥感^[1-4]。为了提高盐度反演精度, Gabarro 等^[5]首次使用 L 波段微波辐射计对地中海西部海域进行长时期遥感观测, 并基于实测数据得出盐度反演经验模式。航空遥感实验表明, 经验模式可以较好地反演不同海域粗糙海面的盐度^[6]。此外, Ammar 等^[7]使用神经网络方法反演粗糙海面盐度的精度达到 0.6, 为盐度遥感反演提供了新途径。中国在 1988 年的航空盐度遥感试验也表明, 机载 L 波段微波辐射计能够较高精度地反演平静海面的海表盐度^[8]。由于单波段微波辐射计遥感盐度的精度受温度、风速、波高和氧气吸收等海洋大气参量的影响, 研究多波段多极化遥感盐度和温度等多个参数成为提高盐度反演精度的有效途径。Blume 等^[1-2]提出了一种基于线性回归的多项式拟合算法用于 L 和 S 双波段微波遥感平静海面海表盐度和温度, 在遥感亮

温噪音水平低于 0.2 K 的前提下取得了较好的温盐反演结果, 但在近岸海域的盐度反演误差大于 0.5。史久新等^[9]通过深入分析亮温对温盐的敏感性, 指出 L 和 S 波段遥感亮温对低温低盐海表的盐度敏感性较低, 难以达到较高的盐度反演精度。王杰和史久新等^[10-11]对多项式拟合算法进行改进, 得到半解析算法, 使得无偏差的理想数据反演温盐的误差减小到零。目前的实验和研究表明, 除了大气传输和宇宙背景辐射等因素对海表辐射亮温的影响, 海表面粗糙度也是产生海水辐射亮温增益的重要因素。殷晓斌等^[12]研究海面风对海表面辐射的影响, 建立了海面风与亮温修正量之间的关系, 为 L/S 双波段微波遥感盐度反演提供了新的算法。李志等^[13]采用新的基于海面风和有效波高的粗糙度模式反演较高温盐海表的盐度, 使 L 波段盐度反演精度达到了 0.3。然而, 由于盐度反演受海洋大气参数影响, 盐度反演的解析模式和半解析模式难于直接应用, 通常借助

收稿日期: 2011-08-18; 修回日期: 2011-11-21

基金项目: 国家 863 计划(2008AA09A403, 2009AA09Z102); 国家自然科学基金(40876094)

作者简介: 齐震(1986-), 男, 河北沧州人, 硕士, 主要从事海洋遥感研究, E-mail: qizhen19861025@163.com; 魏恩泊, 通信作者, E-mail: ebwei@qdio.ac.cn

建立的经验模式考虑海洋大气参量的微波辐射影响。例如, 基于贝叶斯统计方法的代价函数模式利用欧共体研发的 SMOS(Soil Moisture and Ocean Salinity)卫星获得的粗糙海面多角度亮温观测数据可以更加准确地反演盐度以及其他参数。其研究表明了 L 波段代价函数模式虽然可以高精度反演高温高盐海表的海表盐度, 但是海表盐度和温度同时反演会产生很大的盐度反演误差^[14-15]。然而, 目前文献很少涉及低温低盐海域情况的研究, 代价函数模式是否适合该情况还需进一步分析和讨论。此外, 虽然上述某些研究采用 L 和 S 双波段遥感技术研究盐度遥感取得较好的反演精度, 但前提是遥感亮温噪音水平低于 0.2 K, 这对仪器设计标准和遥感亮温修正的要求过高。

针对上述问题, 本文通过建立粗糙海面 L (1.4 GHz)和 C (6.8 GHz)双波段微波辐射亮温模型, 研究不同极化方式的代价函数联合反演盐度、温度、风速和有效波高等多参数的模式, 得出较好的 L 和 C 双波段多极化组合方式。并采用模拟亮温技术, 在给定亮温噪音水平为 0.5 K 的前提下, 定量分析不同温盐分布对 L 和 C 双波段多极化的代价函数反演精度的影响。

1 模式分析

代价函数是基于最小二乘法约束极小值并采用迭代算法求解未知参量的函数, 适用于非线性关系的多参量反演。根据参量约束条件的有无, 代价函数模式分为限制性代价函数和非限制性代价函数。限制性代价函数中的参数限制项使得代价函数更好地收敛, 但同时参数反演结果在一定程度上受参考值的影响, 限制项对提高盐度反演精度的影响需要更深入的研究^[16]。因此本文使用如下的非限制性代价函数反演盐度和温度等多个参数:

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{[T_{Bi}^{\text{meas}} - T_{Bi}^{\text{model}}(\theta_i, S_{ss}, T_{ss}, W)]^2}{\sigma_{T_{Bi}}^2} \quad (1)$$

其中, θ_i 表示入射角 ($i = 1, 2, 3, \dots, N$), S_{ss} 为海表盐度, T_{ss} 为海表温度(K), W 为影响海表粗糙度的参数, T_{Bi}^{meas} 表示亮温观测值, $\sigma_{T_{Bi}}^2$ 是预期的观测亮温噪音方差, 在本文中取值为 $\sigma_{T_{Bi}}^2 = 0.2$ K(由欧洲中尺度天气预报模式 ECMWF 获得), T_{Bi}^{model} 是从粗糙海面微波辐射模式(2)获得的亮温值:

$$T_B^{\text{model}} = e_p(\varepsilon, \theta)T_{ss} + \Delta T_{Bw} \quad (2)$$

其中, $e_p(\varepsilon, \theta)$ 是海水介电常数 ε 和入射角 θ 的函数:

$$e_v = 1 - \left[\frac{\varepsilon \cos \theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}}{\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}} \right]^2$$

$$e_h = \left[\frac{\cos \theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}} \right]^2$$

ε 是海水温度和盐度的函数, 根据 Debye 方程^[17]得出。

ΔT_{Bw} 是海面粗糙度引起的海面亮温变化。海表粗糙度引起的 L 波段(1.4 GHz)辐射亮温变化为^[15]:

$$\Delta T_{Lh} \approx 0.12 \left(1 + \frac{\theta}{24^\circ} \right) U_{10} + 0.59 \left(1 - \frac{\theta}{50^\circ} \right) H_{sw}$$

$$\Delta T_{Lv} \approx 0.12 \left(1 - \frac{\theta}{40^\circ} \right) U_{10} + 0.59 \left(1 - \frac{\theta}{50^\circ} \right) H_{sw} \quad (3)$$

海表粗糙度引起的 C 波段(6.8 GHz)辐射亮温变化为^[18]:

$$\Delta T_{Ch} = U_{10} \gamma^{1/2} (A + B\theta^2) - 0.0065 \gamma T_{ss}$$

$$\Delta T_{Cv} = U_{10} \gamma^{1/2} (a + b e^{c\theta}) - 0.0065 \gamma T_{ss} \quad (4)$$

其中, $A = 1.15 \times 10^{-1}$, $B = 3.8 \times 10^{-5}$, $a = 1.17 \times 10^{-1}$, $b = -2.09 \times 10^{-3}$, $c = 7.32 \times 10^{-2}$, ΔT_{Lh} 和 ΔT_{Lv} 分别为海表粗糙度引起的 L 波段 H 极化和 V 极化的亮温增益, ΔT_{Ch} 和 ΔT_{Cv} 分别为海表粗糙度引起的 C 波段 H 极化和 V 极化的亮温增益, U_{10} 为海表面 10 m 处风速, H_{sw} 为有效波高, γ 为微波辐射频率(GHz)。

本文通过分析 L 和 C 波段的极化亮温对盐度、温度、风速和有效波高参数的敏感性, 即公式(2)的模式亮温对各参量的偏导数: $\Delta T_B^{\text{model}} / \Delta P$, 从而确定 L 和 C 波段反演多参数的最佳极化组合, 其中 P 表示各参数(S_{ss} , T_{ss} , U_{10} 或 H_{sw})。图 1 为 L 和 C 波段的垂直和水平极化亮温对盐度的敏感性, 其中, L_v , L_h , C_v 和 C_h 分别表示 L 波段垂直极化, L 波段水平极化, C 波段垂直极化和 C 波段水平极化的亮温对盐度的敏感性曲线。温度取值分别为 15°C 和 30°C, 入射角 θ 为 45°。由图 1 可知, L 和 C 波段亮温对盐度的敏感性随温度的增加而增大。4 条曲线中 L 波段垂直极化亮温敏感性曲线函数值较大, 即 L 波段垂直极化亮温对盐度的敏感性较高, 水平极化亮温次之, 而 C 波段垂直和水平极化亮温敏感性曲线函数值相近且都很小, 即 C 波段亮温对盐度的敏感性很低。由上述分析得, 盐度的敏感极化方式为 L 波段垂直极化。

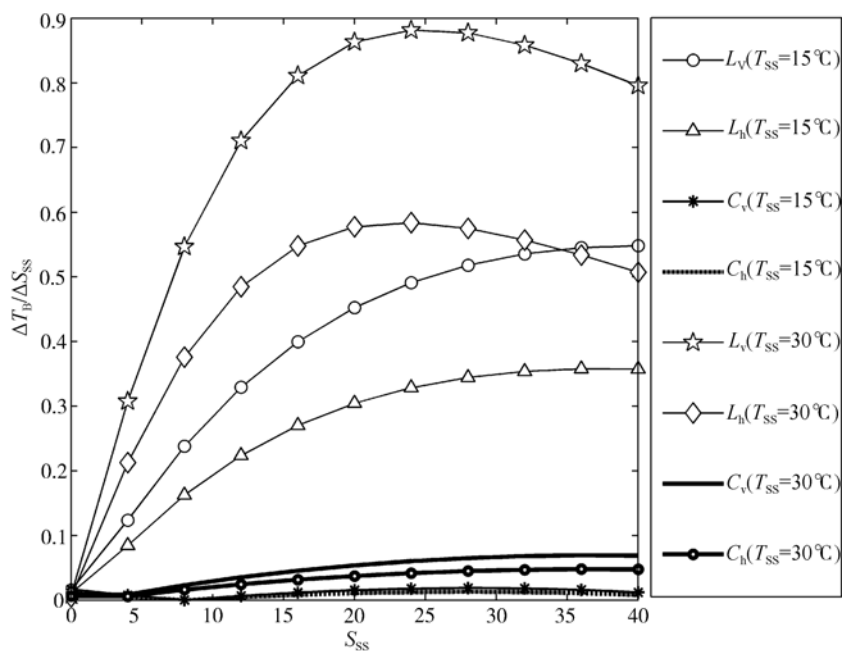


图 1 L 和 C 波段不同极化亮温对海表盐度的敏感性曲线

Fig. 1 The sensitivity of horizontal and vertical polarized brightness temperature (including L-band and C-band) to S_{ss}

由 L 和 C 波段不同极化亮温对温度的敏感性曲线(图 2)可知, L 和 C 波段亮温对温度的敏感性随盐度的增加而减小。图中, L_v , L_h , C_v 和 C_h 分别表示 L 波段垂直极化, L 波段水平极化, C 波段垂直极化和 C 波段水平极化的亮温对温度的敏感性曲线。盐度取值分别为 15 和 30, 入射角 θ 为 45° 。C 波段垂直极

化亮温对温度的敏感性较高, 且温度在 25°C 附近时敏感性达到峰值。在常见温度($10\sim 40^\circ\text{C}$)区域, L 波段垂直极化亮温对温度的敏感性普遍较低, 只有在温度很低($T_{ss} < 10^\circ\text{C}$)时, L 波段垂直极化亮温对温度的敏感性较好。此外, L 和 C 波段水平极化亮温对温度的敏感性都较低。所以, 温度的敏感极化方式为 C

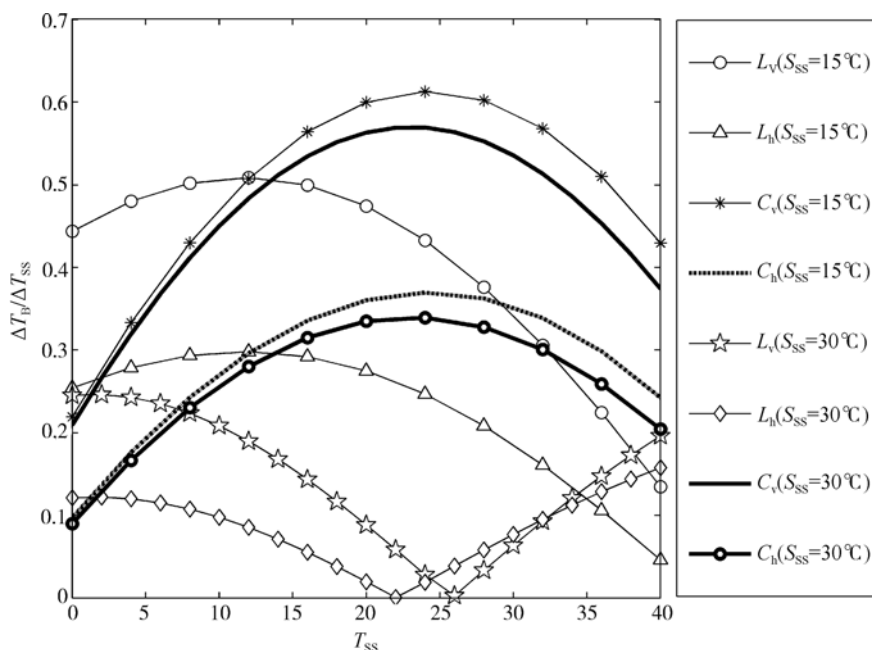


图 2 L 和 C 波段不同极化亮温对海表温度的敏感性曲线

Fig. 2 The sensitivity of horizontal and vertical polarized brightness temperature (including L-band and C-band) to T_{ss}

波段垂直极化。

由经验模式(3), (4)可知, L 和 C 波段亮温和风速之间为线性关系, 即亮温对风速的敏感性不受盐度、温度、有效波高和风速等参数的影响, 而只与入射角 θ 相关。图 3 为 L 和 C 波段不同极化亮温对风速的敏感性随入射角 θ 变化的曲线, 其中, L_v , L_h , C_v 和 C_h 分别表示 L 波段垂直极化, L 波段水平极化, C 波段垂直极化和 C 波段水平极化的亮温对风速的敏感性曲线。可以明显看出, C 波段水平极化亮温对风速的敏感性较好, 且随入射角 θ 的增加而增大。L 波段水平极化亮温对风速的敏感性稍差, L 和 C 波段垂直极化亮温对风速敏感性较差。总之, 风速的敏感极化方式为 C 波段水平极化。

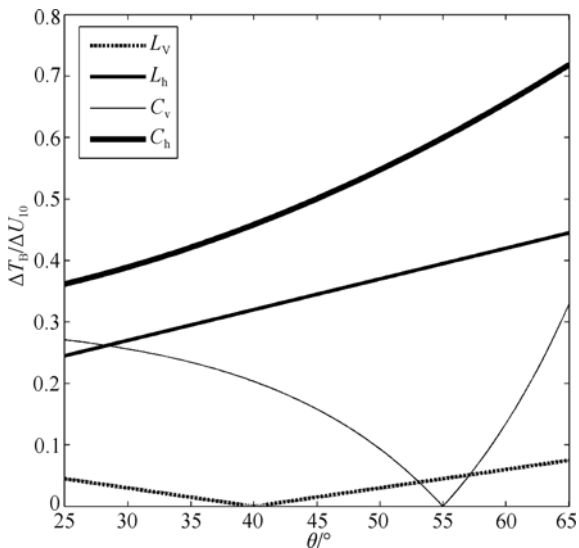


图 3 L 和 C 波段不同极化亮温对海表风速的敏感性随入射角变化的曲线

Fig. 3 The sensitivity of horizontal and vertical polarized brightness temperature (including L-band and C-band) to U_{10}

同样由经验模式(3), (4)可知, 只有 L 波段亮温和有效波高参数相关, 二者之间为线性关系, 且对于相同入射角, L 波段垂直极化和水平极化亮温对有效波高的敏感性相同。即 L 波段亮温对有效波高的敏感性不受盐度、温度、风速和有效波高等参数的影响, 只随入射角 θ 的变化而变化。本文通过分析 L 和 C 波段对有效波高的敏感性, 得出了入射角 θ 在 $25^\circ \sim 65^\circ$ 变化时 L 波段亮温对有效波高的敏感性要小于 0.3 的结论。较低的敏感性导致有效波高参数反演误差较大, 又因为有效波高的测量值较小, 所以其反演精度较低, 即有效波高参数不适合用本文的 L

和 C 波段经验模式反演。

由上述分析可得, 对盐度敏感的 L 波段垂直极化亮温和对温度敏感的 C 波段垂直极化亮温适于联合反演盐度和温度。为了进一步验证此结论, 本文绘制了 L 和 C 波段不同极化亮温组合联合反演盐度和温度的代价函数曲线, 如图 4a, 其中 T_{Bi}^{meas} 为公式(2)计算所得模式亮温值, $[L_v, C_v]$, $[L_h, C_v]$, $[L_v, C_h]$ 和 $[L_h, C_h]$ 分别表示 L 和 C 波段垂直极化组合, L 波段水平极化和 C 波段垂直极化组合, L 波段垂直极化和 C 波段水平极化组合, 以及 L 和 C 波段水平极化组合。盐度、温度、风速和有效波高的真实值分别取 15, 15°C , 5 m/s 和 0.6 m, 入射角 θ 在 $25^\circ \sim 65^\circ$ 每隔 5° 取值, 代价函数值为 0.1 ($\chi^2=0.1$)。代价函数值越小曲线收敛就越好, 显然, L 和 C 双波段垂直极化的亮温组合 $T_B = [T_{L_v}, T_{C_v}]$ 联合反演盐度和温度的代价函数曲线收敛较好, 椭圆形的代价函数曲线表明, 盐度变化范围为 12.5~17.5, 温度值范围为 $13.9 \sim 16.1^\circ\text{C}$, 可见代价函数对温度更敏感。L 波段水平极化和 C 波段垂直极化的亮温组合 $T_B = [T_{L_h}, T_{C_v}]$ 联合反演盐度和温度的代价函数曲线收敛稍差, 更宽广的盐度变化范围(11.8~17.6)表明此代价函数对盐度不敏感, 所以会产生较大的盐度反演误差。此外, 可以明显看出其他两个双波段组合的代价函数收敛均较差。

通过分析 L 和 C 波段亮温对盐度和风速的敏感性得出对盐度敏感的 L 波段垂直极化亮温和对风速敏感的 C 波段水平极化亮温适于联合反演盐度和风速。图 4b 为 L 和 C 波段不同极化亮温组合联合反演盐度和风速的代价函数曲线, 其中 T_{Bi}^{meas} 为公式(2)的模式亮温值, 盐度、温度、风速和有效波高的真实值分别取 15, 15°C , 5 m/s 和 0.6 m, 入射角 θ 在 $25^\circ \sim 65^\circ$ 每隔 5° 取值, 代价函数值为 0.1 ($\chi^2=0.1$)。可以看出, L 波段垂直极化和 C 波段水平极化亮温组合 $T_B = [T_{L_v}, T_{C_h}]$ 联合反演盐度和风速的代价函数曲线收敛较好。盐度值范围为 13.3~16.6, 风速值范围为 3.8~6.2 m/s, 代价函数对风速更敏感。L 和 C 双波段水平极化组合亮温 $T_B = [T_{L_h}, T_{C_h}]$ 联合反演盐度和风速时, 盐度的变化范围较大, 所以会产生较大的盐度反演误差。L 和 C 双波段垂直极化亮温组合 $T_B = [T_{L_v}, T_{C_v}]$ 联合反演盐度和风速时, 较宽广的风速取值范围(2~8 m/s)会产生较大的风速反演误差。而对于 L 波段水平极化和 C 波段垂直极化亮温组合 $T_B = [T_{L_h}, T_{C_v}]$ 联合反

演盐度和风速, 盐度和和风速较宽广的参数取值范围

表明这两个参数均不能较好地反演。

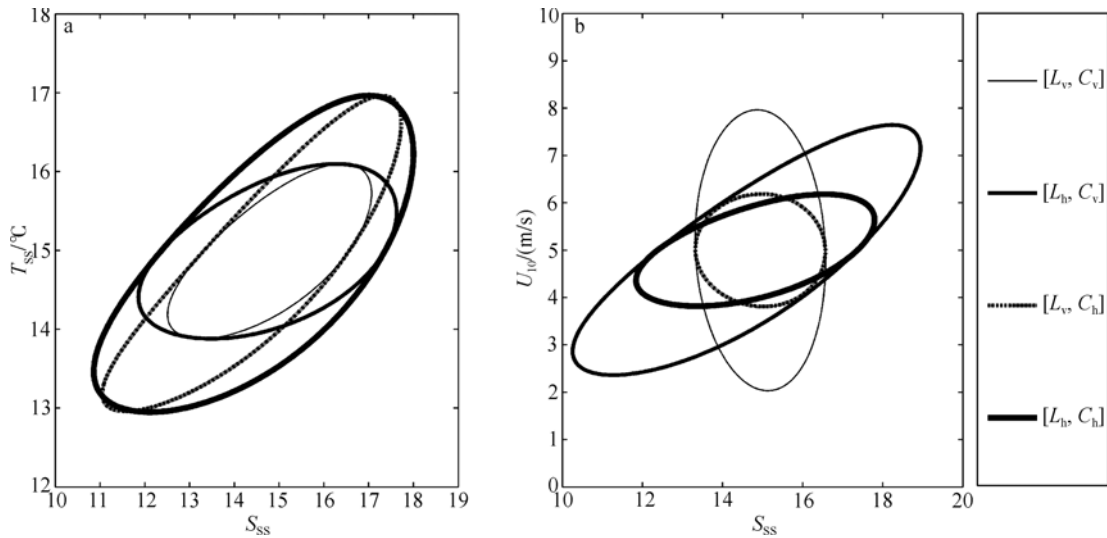


图4 L和C波段不同极化亮温组合联合反演海表盐度和温度、风速的代价函数曲线

Fig. 4 Cost function contour plots of retrieving S_{ss} and T_{ss} and U_{10} with different polarization combinations of L-band and C-band brightness temperature

因为L波段垂直极化、C波段垂直极化和C波段水平极化分别为盐度、温度和风速的敏感极化方式, 所以采用这三个极化波段组合 $T_B = [T_{Lv}, T_{Cv}, T_{Ch}]$ 联合反演盐度、温度和风速可以获得较好的精度。图5为这三个极化波段联合反演盐度、温度和风速的代价函数曲面图, 阴影部分为曲面在各坐标平面的投影。其中 T_{Bi}^{meas} 为公式(2)的模式亮温值, 盐度、

温度、风速和有效波高的真实值分别取 15, 15°C, 5 m/s 和 0.6 m, 入射角 θ 在 25°~65°每隔 5°取值, 代价函数值为 0.1 ($\chi^2=0.1$)。椭圆形的曲面表明代价函数较好地收敛, 盐度在 11.7~17.1 取值, 温度取值范围为 13.9~16.1°C, 风速取值范围为 3.6~6.4 m/s, 代价函数对温度和风速较敏感, 即温度和风速反演误差较小。

综上所述得出以下结论: (1) S_{ss} 和 T_{ss} 双参数反演的最佳组合波段为 $T_B = [T_{Lv}, T_{Cv}]$ 。(2) S_{ss} 和 U_{10} 双参数反演的最佳波段组合为 $T_B = [T_{Lv}, T_{Ch}]$ 。(3) S_{ss} , T_{ss} 和 U_{10} 三参数反演的最佳波段组合为 $T_B = [T_{Lv}, T_{Cv}, T_{Ch}]$ 。

2 反演误差分析

根据上述联合反演多参数的双波段最佳极化组合, 本文采用模拟观测亮温代替真实观测亮温的方法, 反演盐度、温度和风速等多参数, 并对反演误差进行定量分析, 具体步骤如下: 首先用 Matlab 软件随机生成 20 组期望值为 0 K, 标准差为 0.5 K 的高斯噪声 T_B^{noise} , 每组噪声有 9 个值, 对应着 9 个从 25°到 65°每隔 5°选取的入射角, 然后将每组噪声一一对应地添加到模式计算出的亮温 T_B^{model} 上得到模拟亮温 $T_{Bi}^{meas} = T_{Bi}^{model} + T_{Bi}^{noise}$ ($i=1,2,\dots,9$), 对每组模拟亮温值进行参量反演得到一组反演参数值, 最后将 20 组参数反演结果分别取绝对误差, 求得它们的平均值,

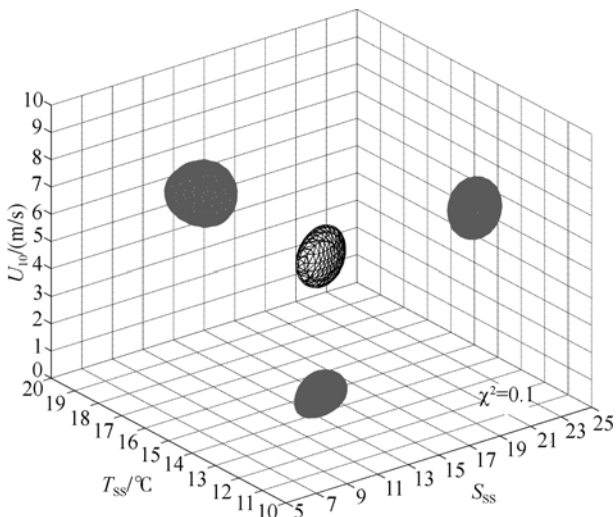


图5 L波段垂直极化和C波段双极化的代价函数联合反演盐度、风速以及有效波高三参数的曲面

Fig. 5 Cost function contour plots of retrieving S_{ss} , T_{ss} and U_{10} with the combination of L-band vertical polarization, C-band vertical polarization and C-band horizontal polarization brightness temperature

即得到参数反演的平均绝对误差。其中，海表风速和有效波高的模拟真实值分别为 5 m/s 和 0.6 m。

基于上述模拟亮温方法，L 和 C 双波段垂直极化的代价函数采用 Levenberg-Marquardt 优化算法联合反演盐度和温度。盐度反演的平均绝对误差如表 1，可以看出，在较高的温盐海域($S_{ss}>10$, $T_{ss}>10^{\circ}\text{C}$)，盐度反演的平均绝对误差小于 0.5，且盐度反演误差随

盐度和温度的增加呈减小趋势。只有在很低的温盐区域($S_{ss}<10$, $T_{ss}<10^{\circ}\text{C}$)，盐度的平均绝对误差才会大于 0.5，这是由于低温盐海域海水亮温在 L 波段对盐度的敏感性相对高温盐海域较低，导致盐度反演误差较大。同时，在海域($5<S_{ss}<40$, $5^{\circ}\text{C}<T_{ss}<40^{\circ}\text{C}$)内，温度反演的平均绝对误差控制在 0.2~0.3 $^{\circ}\text{C}$ 的水平。

表 1 L 和 C 双波段双垂直极化的代价函数联合反演温盐得到的盐度平均绝对误差

Tab. 1 Cost function simultaneously retrieve the S_{ss} and T_{ss} with the combination of L-band vertical polarization and C-band vertical polarization brightness temperature

| $T_{ss}(^{\circ}\text{C})$ | 盐度平均绝对误差 | | | | | | | |
|----------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | S_{ss} | | | | | | | |
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| 5 | 1.4605 | 0.7657 | 0.4761 | 0.2995 | 0.1923 | 0.1446 | 0.1063 | 0.1149 |
| 10 | 0.8545 | 0.4224 | 0.2473 | 0.1601 | 0.1203 | 0.0905 | 0.0888 | 0.1232 |
| 15 | 0.5346 | 0.2528 | 0.1493 | 0.1074 | 0.0801 | 0.0693 | 0.0927 | 0.1316 |
| 20 | 0.3548 | 0.1646 | 0.1035 | 0.0748 | 0.0591 | 0.0704 | 0.1003 | 0.1350 |
| 25 | 0.2463 | 0.1138 | 0.0750 | 0.0541 | 0.0537 | 0.0761 | 0.1071 | 0.1375 |
| 30 | 0.1770 | 0.0850 | 0.0555 | 0.0427 | 0.0578 | 0.0854 | 0.1137 | 0.1416 |
| 35 | 0.1322 | 0.0653 | 0.0413 | 0.0431 | 0.0678 | 0.0956 | 0.1226 | 0.1494 |
| 40 | 0.1034 | 0.0506 | 0.0324 | 0.0532 | 0.0826 | 0.1104 | 0.1374 | 0.1644 |

注：亮温噪音期望为 0 K，标准差为 0.5 K

L 波段垂直极化和 C 双波段水平极化的代价函数优化算法联合反演盐度和风速结果分析，具体见表 2。盐度反演平均绝对误差比表 1 较小，因为比较图 4 和图 5 可知，图 5 的代价函数收敛更好，对盐度的敏感性更高，即盐度的反演误差较小。同时，风速反演精度较高，在海域($5<S_{ss}<40$, $5^{\circ}\text{C}<T_{ss}<40^{\circ}\text{C}$)内，

风速平均绝对误差要小于 0.3 m/s。

L 波段垂直极化和 C 波段双极化的代价函数联合反演盐度、温度和风速三参数结果(表略)具体分析如下：其盐度反演的平均绝对误差较表 1 有所增加，但温度和风速的反演精度较高。温度反演的平均绝对误差一般在 0.3 $^{\circ}\text{C}$ 以下，风速反演的平均绝对误差

表 2 L 波段垂直极化和 C 波段水平极化的代价函数联合反演盐度和风速得到的盐度平均绝对误差

Tab. 2 Cost function simultaneously retrieving S_{ss} and U_{10} with the combination of L-band vertical polarization and C-band horizontal polarization brightness temperature

| $T_{ss}(^{\circ}\text{C})$ | 盐度平均绝对误差 | | | | | | | |
|----------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | S_{ss} | | | | | | | |
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| 5 | 0.9219 | 0.4628 | 0.3310 | 0.2692 | 0.2340 | 0.2119 | 0.1973 | 0.1876 |
| 10 | 0.6237 | 0.3286 | 0.2406 | 0.1997 | 0.1771 | 0.1636 | 0.1553 | 0.1505 |
| 15 | 0.4404 | 0.2399 | 0.1796 | 0.1523 | 0.1380 | 0.1302 | 0.1262 | 0.1248 |
| 20 | 0.3208 | 0.1796 | 0.1375 | 0.1194 | 0.1108 | 0.1069 | 0.1060 | 0.1070 |
| 25 | 0.2401 | 0.1379 | 0.1082 | 0.0963 | 0.0916 | 0.0906 | 0.0918 | 0.0946 |
| 30 | 0.1844 | 0.1086 | 0.0875 | 0.0800 | 0.0782 | 0.0792 | 0.0820 | 0.0861 |
| 35 | 0.1456 | 0.0880 | 0.0729 | 0.0686 | 0.0687 | 0.0713 | 0.0753 | 0.0805 |
| 40 | 0.1184 | 0.0734 | 0.0626 | 0.0605 | 0.0622 | 0.0659 | 0.0709 | 0.0770 |

注：亮温噪音期望为 0 K，标准差为 0.5 K

小于 0.3 m/s。

综上所述,在模拟亮温噪音期望为 0 K,标准差为 0.5 K 的前提下, L 和 C 波段不同极化组合的代价函数联合反演海表盐度、温度和风速等参数得到了较好的反演结果。但在较低的温盐海域,盐度反演误差仍较大,这是由 L 和 C 波段遥感亮温对盐度较低的敏感性导致的。较低海表盐度的敏感波段频率在 0.3 GHz 左右^[19]。所以,遥感低频波段的选取是提高较低温盐海域的盐度反演精度的关键。

3 结论

本文通过分析比较 L 和 C 波段不同极化遥感亮温对海表盐度、温度、风速和有效波高等参数的敏感性,得出反演各参数的敏感极化方式,并通过分析 L 和 C 双波段多极化组合反演多参数的代价函数收敛特性,验证了反演多参数的 L 和 C 双波段最佳极化组合为: $[T_{Lv}, T_{Cv}]$ 组合适用于联合反演盐度和温度, $[T_{Lv}, T_{Ch}]$ 组合联合反演盐度和风速较好, $[T_{Lv}, T_{Cv}, T_{Ch}]$ 组合联合反演盐度、温度和风速三参数较好。为了定量分析 L 和 C 双波段最佳极化组合代价函数的多参数反演误差,在模拟亮温噪音水平为 0.5 K 的前提下反演了多参数。结果表明:温度和风速的平均绝对误差分别控制在 0.3°C 和 0.3 m/s 以下,在较宽广的温盐海域($10 < S_{ss} < 40$, $10^\circ\text{C} < T_{ss} < 40^\circ\text{C}$),盐度反演的平均绝对误差小于 0.5,但是在很低的温盐海域($S_{ss} < 10$, $T_{ss} < 10^\circ\text{C}$),盐度的反演误差较大。这主要是因为 L 和 C 波段的遥感亮温在低温低盐海域对盐度敏感性较低。虽然本文详细分析了双波段温盐等多参数的优化组合模式,但提高海表盐度反演精度仍是目前海洋遥感的关键问题。特别是白冠覆盖海面、低温盐海域等盐度遥感的难点问题。

参考文献:

[1] Blume C H J, Kendall M B, Fedors C J. Measurement of ocean temperature and salinity via microwave radiometry[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1978, 13(1-4): 295-308.

[2] Blume C H J, Kendall M B. Passive microwave measurements of temperature and salinity in coastal zones[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1982, GE-20(3): 394-404.

[3] Swift T C, McIntosh E R. Considerations for micro-

wave remote sensing of ocean-surface salinity[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1983, GE-21(4): 480-491.

[4] Lerner R M, Hollinger J P. Analysis of 1.4 GHz radiometric measurements from Skylab[J]. *Remote Sensing Environment*, 1977, 6(4): 251-269.

[5] Gabarro C, Font J, Camps A, et al. Sea Surface Salinity and Wind Speed Retrieval from a Tower-Based L-Band Radiometer in the NW Mediterranean[C]. *Jose A S. Recent Advances In Quantitative Remote Sensing*. Spain: Universitat de Valencia, 2002: 761-769.

[6] Gabarro C, Font J, Miller J, et al. The use of a semi-empirical emissivity model for a rough estimation of sea surface salinity from an airborne microwave radiometer[J]. *Scientia Marina*, 2008, 72(2): 329-336.

[7] Ammar A, Labroue S, Obligis E, et al. Sea surface salinity retrieval for the SMOS mission using neural networks[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2008, 46(3): 754-764.

[8] 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*, 1992, 13(2): 62-67.

[9] 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.

[10] 史久新, 陆兆轼, 李淑江, 等. L/S 波段微波遥感海表盐度和温度的反演算法[J]. *高技术通讯*, 2006, 16(11): 1181-1184.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] Gabarro C. Study of salinity retrieval errors for the SMOS mission[D]. Barcelona: Dept. de Geologia Marina I Oceanografia Fisica, Institut de Ciencies del Mar (CSIC), 2004.

[15] Gabarro C, Portabella M, Talone M, et al. Toward an optimal SMOS ocean salinity inversion algorithm[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2004, 6(3): 509-513.

- [16] Sabia R, Camps A, Talone M, et al. Determination of the sea surface salinity error budget in the Soil Moisture and Ocean Salinity mission[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2010, 48(4): 1684-1693.
- [17] Debye P J W. Polar molecules[M]. New York: The Chemical Catalog Co., 1929.
- [18] Pandey P, Kakar R. An empirical microwave emissivity model for a foam-covered sea[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1982, 7(3): 135-140.
- [19] Kachan M V, Pimenov S F. Remote sensing of water salinity at decameter wavelengths[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1997, 35(2): 302.

Rough sea surface cost function retrieval models for L and C band

QI Zhen^{1,2}, WEI En-bo¹, LIU Shu-bo^{1,2}

(1. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Received: Aug., 18, 2011

Key words: sea surface roughness; cost function; sea surface salinity; brightness temperature; L and C bands

Abstract: Based on the cost functions of rough sea surface brightness temperatures, the sensitivities of L and C band brightness temperatures to sea surface salinity (S_{ss}), temperature (T_{ss}), wind speed (U_{10}), and significant wave height (H_{sw}) were analyzed. By analyzing the cost function sensitivities of vertical and horizontal polarizations for both L and C band, the optimum polarization model was built for retrieving sea surface parameters. We found that (1) the vertical polarizations of both L and C band can be used to simultaneously retrieve S_{ss} and T_{ss} ; (2) the vertical polarization of L band and horizontal polarization of C band can be adapted to retrieve S_{ss} and U_{10} simultaneously; (3) the vertical polarization of L band combining with either vertical or horizontal polarization of C band was suitable for retrieving S_{ss} , T_{ss} and U_{10} ; (4) because of the low sensitivity of L band brightness temperature to H_{sw} parameter, the cost function of both L and C band can not be used to estimate H_{sw} . Furthermore, with the simulated brightness temperature of additive noises, the optimum multi-polarization models were used to retrieve S_{ss} , T_{ss} and U_{10} . The retrieval results showed that these optimum models were reliable at a higher noise level.

(本文编辑: 刘珊珊)