

文章编号:1001-9014(2012)01-0091-06

单通道物理法反演海表温度的 参数敏感性分析及验证

周旋^{1,2}, 杨晓峰¹, 程亮², 李紫薇¹

(1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 中国人民解放军 61741 部队, 北京 100095)

摘要:定量分析了反演海表温度的单通道物理法对海水比辐射率、海面风速、海水盐度、大气透过率、大气上下行辐射等参数的敏感性,发现海水比辐射率、大气透过率对算法精度影响较大,是单通道物理法反演海表温度的主要误差来源.在不同的波段,单通道物理法对参数敏感性也有较大差别,中红外波段的敏感性要小于热红外波段.为了验证单通道物理法的可行性、精度及参数敏感性分析的结果,选择墨西哥湾海域 2009 年全年夜间 MODIS 实测数据进行实验.结果表明,中红外波段的单通道物理法反演海表温度的精度高于热红外波段,达到 MODIS 劈窗算法海表温度标准产品同等精度,这与参数敏感性分析的结果一致.由于中红外波段单通道物理法精度较高,一方面,可以满足常规的业务观测需求,为海表温度反演提供新的技术手段;另一方面,可用来标定劈窗算法系数,弥补海洋现场观测站位空间分布不足的问题.

关键词:单通道物理法;大气温湿廓线;海表温度;敏感性分析;

中图分类号:P731.11 **文献标识码:**A

Sensitivity analysis and validation of the single channel physical method for retrieving sea surface temperature

ZHOU Xuan^{1,2}, YANG Xiao-Feng¹, CHENG Liang², LI Zi-Wei¹

(1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. 61741 Troops of PLA, Beijing 100095, China)

Abstract: After analyzing quantitatively the sensitivity of sea surface emissivity, sea surface wind, sea water salinity, atmospheric transmittance, and atmospheric upwelling/downward radiation on the sea surface temperature (SST) retrieval from a single channel physical-based SST algorithm, it was concluded that that sea surface emissivity and atmospheric transmittance have greater impact on the accuracy of SST retrieval than the others. Deriving SST with different single infrared channel (3.7 μm), we found that the mid-infrared single channel physical-based SST algorithm is less sensitive to the accuracy requirements of these input parameters than that based in thermal band (11 μm and 12 μm). The night-time MODIS data taken in the Gulf of Mexico around the year of 2009 was used to validate the feasibility and accuracy of this algorithm and the sensitivity analysis. The result shows that the single physical channel method based on mid-infrared band is the optimal choice in case only one infrared channel is available on the space instrument. Furthermore, the algorithm at mid-infrared band can help to derive the operational coefficients for traditional split-window algorithm.

Key words: single channel physical method; atmospheric temperature and humidity profiles; sea surface temperature; sensitivity analysis

PACS: 92.30.Tq

引言

海表温度 (Sea Surface Temperature, 简称 SST)

是研究海气界面水汽和能量交换的一个重要物理参数. 海水的热容量很大, SST 的微小变化将会对大气温度、大气环流和天气形势造成极大影响, 因此相关

收稿日期: 2011-02-09, 修回日期: 2011-11-13

Received date: 2011-02-09, revised date: 2011-11-13

基金项目: 国家 863 资助项目 (2006AA09Z137); 中科院重大科研装备研制项目 (YZ200946); 国家海洋局“渤海环境立体监测与动态评价专项” (08Q0090034)

Foundation item: Supported by National 863 High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA09Z137); Major Program for the Research equipment of the Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. YZ200946); Special Research for Three-Dimensional Monitoring and Dynamic Evaluation of Bohai Environment of State Oceanic Administration of China (Grant No. 08Q0090034)

作者简介: 周旋 (1981-), 男, 河南罗山人, 工程师, 博士研究生, 主要从事海表温度的反演研究. E-mail: youme_zx@163.com.

领域研究工作对卫星遥感反演 SST 数据的精度要求很高. 现有的 SST 卫星遥感反演业务化系统均采用半物理半统计的劈窗算法, 主要包括多通道、非线性和探索者等. 通过分裂窗技术可消除对流层水汽对大气辐射的影响, 其算法系数通常利用大量实测的 0.3 ~ 1 m 深度的水体温度进行标定, 精度达到 0.5 K^[1], 可以满足海洋锋面、上升流、赤道急流和海洋涡旋等短周期海洋现象的观测需求, 但由于海水皮肤效应的存在, 进一步提高 SST 的反演精度并非易事. 此外, 由于卫星传感器的在轨衰减和区域大气成分的变化, 劈窗算法系数在业务化应用过程中需要不定期重新标定. 对于缺乏足够浮标数据支持的海域, 难以保证 SST 的反演精度.

单通道物理法反演的 SST 是海水表层温度, 时空变化适应性强, 尤其适用于缺乏浮标数据的海域, 其精度在理论上要高于 0.5 K, 不过对大气温湿廓线和海水比辐射率方向性模型提出了很高的要求. Akihiro^[2] 和李万彪^[3] 曾进行过单通道物理法反演 SST 的研究, 由于缺少精确的大气温湿廓线, 并对海水比辐射率模型进行了过度简化, 反演 SST 的均方根误差达到 2.86K, 难以满足业务化的要求.

近年来卫星遥感技术迅猛发展, AQUA/MODIS、AQUA/AIRS、TERRA/MODIS、METOP/IASI 和 FY-3/IRAS 等先进的大气廓线探测载荷陆续上天, 使获取精确的大气温湿廓线成为可能, 另外, Masuda^[4] 和 Wu^[5] 等人改进了海水的比辐射率方向性模型, 修正了粗糙海面多次散射对比辐射率的影响, 这些技术进步和理论突破为改进和应用单通道物理法奠定了基础.

1 单通道物理法

根据热辐射传输方程, 卫星传感器接收到的热辐射亮度值由 3 部分组成^[6], 即

$$L_{\lambda}(\theta) = \tau_{\lambda}(\theta)\varepsilon_{\lambda}(\theta)B_{\lambda}(T) + L_{\lambda}^{\uparrow}(\theta) + \tau_{\lambda}(\theta)\int_{2\pi} f(\theta', \varphi', \theta, \varphi)L_{\lambda}^{\downarrow}(\theta')\cos\theta'd\Omega' \quad (1)$$

式(1)中, $L_{\lambda}(\theta)$ 表示卫星传感器的热辐射亮度值, $\tau_{\lambda}(\theta)$ 表示整层大气的总透过率, $\varepsilon_{\lambda}(\theta)$ 表示海水比辐射率, $B_{\lambda}(T)$ 表示温度为 T 时的黑体辐射亮度, $f(\theta', \varphi', \theta, \varphi)$ 表示海面的双向反射分布函数, $L_{\lambda}^{\downarrow}(\theta')$ 表示大气的下行辐射亮度, $L_{\lambda}^{\uparrow}(\theta)$ 表示大气的上行辐射亮度, λ 表示波长, θ' 和 φ' 分别表示大气下行辐射的天顶角和方位角, θ 和 ϕ 分别表示大气

上行辐射的天顶角和方位角.

若大气下行辐射在半球空间内取常数^[7], 海面半球方向反射率 $\rho_{\lambda}(\theta, \varphi \rightarrow \Omega) = \int_{2\pi} f_{\lambda}(\theta', \varphi', \theta, \varphi)\cos\theta'd\Omega'$, 则

$$\int_{2\pi} f_{\lambda}(\theta', \varphi', \theta, \varphi)L_{\lambda}^{\downarrow}(\theta')\cos\theta'd\Omega' = L_{\lambda}^{\downarrow}\rho_{\lambda}(\theta, \varphi \rightarrow \Omega) \quad (2)$$

在局地热平衡条件下, 根据方向基尔霍夫定律和能量守恒定律, $\rho_{\lambda}(\theta, \varphi \rightarrow \Omega) = 1 - \varepsilon_{\lambda}(\theta, \varphi)$, 假定海水比辐射率与方位角 φ 无关, 则式(1)变为

$$L_{\lambda}(\theta) = \tau_{\lambda}(\theta)\varepsilon_{\lambda}(\theta)B_{\lambda}(T) + L_{\lambda}^{\uparrow}(\theta) + \tau_{\lambda}(\theta)[1 - \varepsilon_{\lambda}(\theta)]L_{\lambda}^{\downarrow} \quad (3)$$

由式(3)可知, 只要获得海水比辐射率、大气上行辐射亮度、下行辐射亮度和大气透过率等四个参数就可以计算 SST, 反演精度由这四个参数的精度决定. 海水比辐射率由海面风速、海水盐度和观测天顶角等因素决定, 可以利用海面波浪的几何光学模型计算出来; 大气上行辐射亮度、下行辐射亮度和大气透过率由大气温湿廓线决定, 目前, 在轨运行的 AQUA/AIRS、METOP/IASI、AQUA/MODIS 和 TERRA/MODIS 等大气廓线探测载荷都可以获得比较精准的大气温湿廓线参数, 但精度有差别. 下面将分析单通道物理法即式(3)对海水比辐射率、大气上行辐射亮度、下行辐射亮度和大气透过率等参数的敏感性以及在现有的卫星探测大气温湿廓线的精度条件下单通道物理法所能达到的精度.

2 参数敏感性分析

2.1 对比辐射率的敏感性分析

对某一特定通道, 假定传感器观测的目标辐亮度、大气透过率、大气下行辐射亮度和上行辐射亮度不存在误差, 设 $\Delta\varepsilon_{\lambda}(\theta)$ 为比辐射率误差, ΔT 为比辐射率误差导致反演 SST 的误差, $\Delta B_{\lambda}(T + \Delta T)$ 为比辐射率误差导致海面辐亮度的误差. 则式(3)变为

$$L_{\lambda}(\theta) = \tau_{\lambda}(\theta)[\varepsilon_{\lambda}(\theta) + \Delta\varepsilon_{\lambda}(\theta)]B_{\lambda}(T + \Delta T) + L_{\lambda}^{\uparrow}(\theta) + \tau_{\lambda}(\theta)[1 - \varepsilon_{\lambda}(\theta) - \Delta\varepsilon_{\lambda}(\theta)]L_{\lambda}^{\downarrow} \quad (4)$$

式(4)中 B 代表 Planck 函数, $B_{\lambda}(T + \Delta T) = B_{\lambda}(T) + \Delta B_{\lambda}(T + \Delta T)$, 由式(3)和式(4)可知

$$B_{\lambda}(T + \Delta T) = \frac{\Delta\varepsilon_{\lambda}(\theta)L_{\lambda}^{\downarrow} + \varepsilon_{\lambda}(\theta)B_{\lambda}(T)}{\varepsilon_{\lambda}(\theta) + \Delta\varepsilon_{\lambda}(\theta)} \quad (5)$$

比辐射率相对误差 $\frac{\Delta\varepsilon_{\lambda}(\theta)}{\varepsilon_{\lambda}(\theta)}$ 记为 δ_{λ} . 当 $|\delta_{\lambda}| \leq 5\%$ 时, 对于某一特定波段, 在较窄的温度区间 ($T -$

$|\Delta T| \leq T \leq T + |\Delta T|$ 内, Planck 函数随温度的变化接近于线性. 将 $B_\lambda(T + \Delta T)$ 和 $B_\lambda(T)$ 展开成线性函数, 则式(5) 变为

$$\Delta T = \frac{\delta_\lambda}{\delta_\lambda + 1} [a_\lambda(T) - T + b_\lambda(T)L_\lambda^\dagger] \quad (6)$$

式(6) 中 $a_\lambda(T) - T$ 远大于 $b_\lambda(T)L_\lambda^\dagger$ (在热带大气模式下, 二者相差 4 个量级), ΔT 近似等于

$$\Delta T \approx \frac{\delta_\lambda}{\delta_\lambda + 1} [a_\lambda(T) - T] \quad (7)$$

若 $273 \text{ K} < T < 313 \text{ K}$, 则当 $\lambda = 3.7 \mu\text{m}$, $a_\lambda(T) = 0.85T + 22.04$; 当 $\lambda = 11 \mu\text{m}$, $a_\lambda(T) = 0.56T + 62.66$; 当 $\lambda = 12 \mu\text{m}$, $a_\lambda(T) = 0.53T + 66.72$.

图 1(a)、(b) 分别为真实温度 280 K、300 K 时, 单通道物理法反演 SST 的精度随比辐射率相对误差的变化关系, 横坐标为比辐射率相对误差, 纵坐标为 SST 误差, SST 误差随比辐射率相对误差的增大而增大. 比辐射率相对误差为负即比辐射率小于真值时, 单通道物理法反演的 SST 高于真值; 反之, 单通道物理法反演的 SST 低于真值. 对比图 1(a) 和 (b) 可以发现, SST 误差对温度变化不敏感, 而对波长变化比较敏感, 随波长增大而增大, 当比辐射率相对误差为 $\pm 5\%$ 时, 波长 $3.7 \mu\text{m}$ 的 SST 误差约 $\pm 1 \text{ K}$, 而波长 $12 \mu\text{m}$ 的 SST 误差约 $\pm 4 \text{ K}$, 明显高于前者, 说明在中红外波段时, 算法对比辐射率的敏感性要小于热红外波段时的敏感性.

海水的比辐射率取决于海面风速、海水盐度和观测天顶角等参数, 海面风速和海水盐度的误差将通过比辐射率影响到 SST 的精度.

2.1.1 海面风速

海面风速影响海表的比辐射率, 当风速大于 15 m/s 时 (约占全球海面风速的 3%), 海面将产生浪花效应, 出现白浪覆盖和泡沫薄层, 目前对它的热辐射特性研究还处于初级阶段. 下面的讨论将限于中

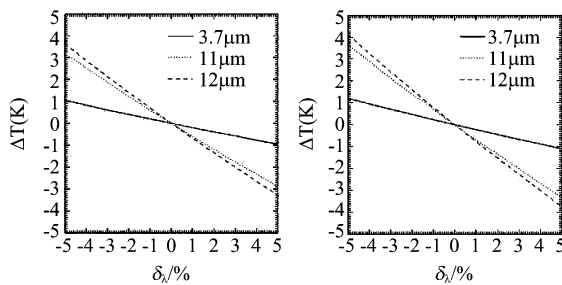


图 1 SST 误差与比辐射率相对误差的变化关系 (a) $T = 280 \text{ K}$ (b) $T = 300 \text{ K}$

Fig. 1 The relationship between SST error and emissivity relative error (a) $T = 280 \text{ K}$ (b) $T = 300 \text{ K}$

低风速 (小于 15 m/s). 在红外波段, 海面波可认为是在长波长重力波背景上随机叠加了小尺度毛细波小面, 而每个小面可视为平面, 其空间取向满足高斯正态分布函数, 均方差由海面风速决定. 通过海面小平面对描述观测辐射区域, 利用菲涅耳公式计算小平面对比辐射率, 然后根据其取向分布函数计算所有小平面对比辐射率的总和, 即可获得海面方向对比辐射率.

图 2 中, i 为 $x-z$ 平面上发射辐射方向的单位矢量; n 为小平面的单位法向量; Φ_n 为 n 的方位角; θ 和 θ_n 分别为 i 和 n 的天顶角; χ 为发射辐射方向和小平面法线方向之间的夹角.

由菲涅耳公式可知, 小平面的比辐射率为:

$$\varepsilon(\chi) = 1 - \frac{1}{2} \left| \frac{\cos\chi' - n\cos\chi}{\cos\chi' + n\cos\chi} \right|^2 - \frac{1}{2} \left| \frac{\cos\chi - n\cos\chi'}{\cos\chi + n\cos\chi'} \right|^2 \quad (8)$$

其中, n 为海水的折射率, $n = \frac{\sin\chi'}{\sin\chi}$, $\cos\chi = \cos\theta\cos\theta_n + \sin\theta\sin\theta_n\cos\phi_n$.

海面的许多小平面对空间中的取向服从高斯正态分布, 众多小平面对海面的比辐射率为:

$$\varepsilon^*(\theta) = \frac{\int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi} \varepsilon(\chi) \cos\chi \sin\theta_n \exp\left[-\frac{\tan^2\theta_n}{2\sigma^2}\right] \cos^{-4}\theta_n d\phi_n d\theta_n}{\int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi} \cos\chi \sin\theta_n \exp\left[-\frac{\tan^2\theta_n}{2\sigma^2}\right] \cos^{-4}\theta_n d\phi_n d\theta_n} \quad (9)$$

$\cos\chi > 0$

式(9) 中, σ 为高斯正态分布函数的均方差, 与海面风速的经验关系为 $2\sigma^2 = 0.003 + 0.00512W$, 式中 W 为风速.

风在海洋表面产生波浪, 传感器获取的红外辐射一部分来自于海面直接发射, 一部分来自于海面多次散射. 当观测天顶角小于 45° 时, 海面的多次散射作用可以忽略; 当观测天顶角大于 45° 时, 需要考虑海面的多次散射作用, 本文采用 K. Masuda 提出的海面多次散射模型对式(9) 计算的结果进行校正.

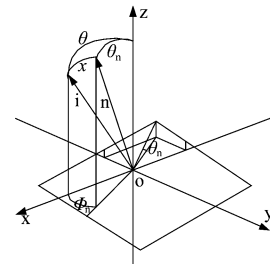


图 2 小平面的几何关系

Fig. 2 Geometry of the facet

利用单通道物理法反演 SST, 在缺少实测风速数据时, 可将全球海面风场的平均风速 (7 m/s) 作为算法的默认风速. 下面利用式 (7)、(9) 计算分析实际风速为 3、5、10、15 m/s 条件下, 采用单通道物理法在默认风速下反演 SST 所引起的误差. 海表温度为 300 K 时, 默认风速和实际风速的差异引起的 SST 误差如图 3 所示.

图 3(a)、(b)、(c) 分别为波长 3.7、11、12 μm 时, 海面风速误差引起的 SST 误差, 横坐标为卫星观测天顶角 (0° ~ 60°), 纵坐标为采用默认风速反演 SST 所造成的误差, SST 误差随着观测天顶角的增大而增大. 当实际风速 (3、5 m/s) 小于默认风速时, 单通道物理法反演的 SST 高于真值; 当实际风速 (10、15 m/s) 大于默认风速时, 反演的 SST 低于真值, 误差大小随实际风速与默认风速差值的增大而增大. 对比图 3(a)、(b)、(c) 可以发现, 海面风速输入值引起的 SST 反演误差随波长的增加而增大, 对中红外波段的影响明显小于热红外波段.

2.1.2 海水盐度

由 (9) 式可知, 海面比辐射率是海水折射率的函数, 而海水折射率与海水盐度有关, 因此, 海水盐度是影响海水比辐射率的因素之一. 全球海水盐度平均值为 34.7 psu, 各处相差悬殊, 特别是江河入海口, 盐度水平梯度极大. 在单通道物理法中, 以 34.7 psu 作为默认盐度计算比辐射率, 默认盐度与实际

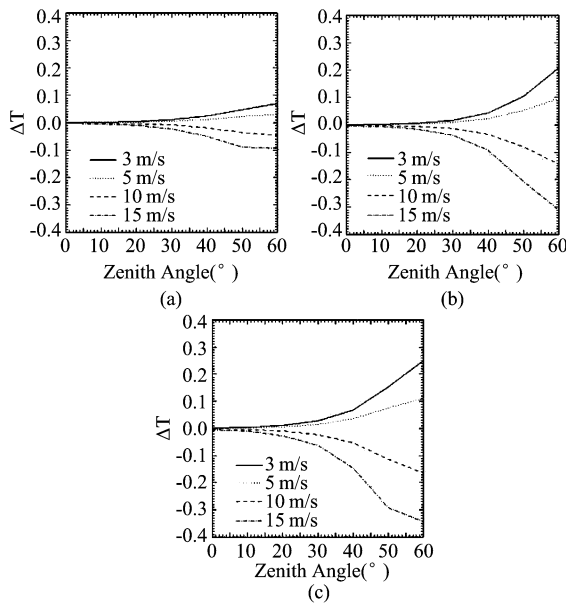


图 3 T 为 300 K 时, 风速误差引起的 SST 误差 (a) 3.7 μm (b) 11 μm (c) 12 μm
 Fig. 3 The SST error induced by wind speed error at the temperature of 300 K (a) 3.7 μm (b) 11 μm (c) 12 μm

盐度相差越大, SST 反演误差越大, 当实际盐度为 0 psu 即纯水时, SST 反演误差最大. 下面分析这种极端情况下的 SST 反演误差.

图 4 为波长 3.7、11、12 μm 情况下, 利用默认盐度的海水代替纯水产生的 SST 误差. 横坐标为卫星观测天顶角 (0° ~ 60°), 纵坐标为采用盐度误差引起的 SST 误差, SST 误差随观测天顶角的增大而增大. 波长为 3.7、11 μm 时单通道物理法反演的 SST 大于真值, 而波长为 12 μm 时反演的 SST 小于真值, 这三种波长条件下的 SST 误差均小于 ±0.2 K, 说明盐度对 SST 的反演影响很小. 在红外波段, 海水折射率随盐度变化很小, 而海面比辐射率是海水折射率的函数, 因此, 盐度对海水比辐射率影响很小, 由盐度误差引起的 SST 反演误差也很小.

对比图 3 和图 4 可知, 单通道物理法对海面风速的敏感性高于海水盐度.

2.2 对大气透过率的敏感性分析

对某一特定通道, 假定传感器观测的目标辐亮度、海水比辐射率、大气下行辐射和上行辐射不存在误差, 设 Δτ_λ(θ) 为大气透过率误差, ΔT 为大气透过率误差导致反演 SST 的误差, ΔB_λ(T + ΔT) 为大气透过率误差导致海面辐亮度的误差. 则式 (3) 变为

$$L_{\lambda}(\theta) = [\tau_{\lambda}(\theta) + \Delta\tau_{\lambda}(\theta)]\varepsilon_{\lambda}(\theta)B_{\lambda}(T + \Delta T) + L_{\lambda}^{\uparrow}(\theta) + [\tau_{\lambda}(\theta) + \Delta\tau_{\lambda}(\theta)][1 - \varepsilon_{\lambda}(\theta)]L_{\lambda}^{\downarrow} \quad (10)$$

由式 (3) 和式 (10) 可知

$$B_{\lambda}(T + \Delta T) = \frac{\varepsilon_{\lambda}(\theta)\tau_{\lambda}(\theta)B_{\lambda}(T) - \Delta\tau_{\lambda}(\theta)[1 - \varepsilon_{\lambda}(\theta)]L_{\lambda}^{\downarrow}}{\varepsilon_{\lambda}(\theta)\Delta\tau_{\lambda}(\theta) + \varepsilon_{\lambda}(\theta)\tau_{\lambda}(\theta)} \quad (11)$$

大气透过率相对误差 $\frac{\Delta\tau_{\lambda}(\theta)}{\tau_{\lambda}(\theta)}$ 记为 ζ_λ. 同式 (7) 推导类似:

$$\Delta T \approx \frac{\zeta_{\lambda}}{\zeta_{\lambda} + 1} [a_{\lambda}(T) - T] \quad (12)$$

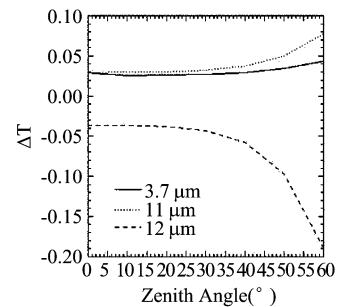


图 4 T 为 300 K 时, 盐度误差引起的 SST 反演误差
 Fig. 4 The SST error induced by salinity error at the temperature of 300 K

$a_\lambda(T)$ 取值与式(7)相同.

对比式(12)与式(7)可知,单通道物理法对大气透过率和比辐射率的敏感性一致.

大气温湿廓线的误差影响大气透过率的精度,其误差大小随高度而变化.利用大气辐射传输模式 MODTRAN 计算热带、中纬度夏季、中纬度冬季、副极地夏季和副极地冬季等五种大气模式,在大气廓线温度误差为 4 K、湿度误差为 25% 的条件下,产生的大气透过率误差,如表 1 所示.

表 1 大气温湿廓线误差引起的大气透过率相对误差
Table 1 The relative error of atmospheric transmittance induced by atmospheric temperature and humidity profile errors

波长	热带大气 (%)	中纬度夏季 (%)	副极地夏季 (%)	中纬度冬季 (%)	副极地冬季 (%)
3.7 μm	-1.21	-1.94	-0.79	0.14	1.49
11 μm	-23.06	-13.67	-7.81	-1.85	-0.21
12 μm	-29.94	-18.06	-10.46	-2.54	-0.19

表 1 为垂直入射条件下,温度 300 K 时,五种大气模式下的大气透过率误差.由表 1 可知,中红外波段大气透过率对大气温湿廓线的敏感性小于热红外波段,中纬度冬季和副极地冬季大气模式的透过率对大气温湿廓线的敏感性小于热带大气、中纬度夏季和热带大气.

由式(12)计算表 1 的大气透过率误差引起的 SST 误差,如表 2 所示.

表 2 大气透过率误差导致的 SST 误差
Table 2 The SST error induced by the relative error of atmospheric transmittance

波长	热带大气 (K)	中纬度夏季 (K)	副极地夏季 (K)	中纬度冬季 (K)	副极地冬季 (K)
3.7 μm	0.28	0.45	0.18	-0.03	-0.34
11 μm	20.78	10.98	5.87	1.30	0.14
12 μm	31.74	16.38	8.68	1.93	0.14

由表 2 可知,在中红外波段,单通道物理法反演的 SST 对大气温湿廓线不敏感,误差在 $\pm 0.5\text{K}$ 以内.而热红外波段对大气温湿廓线的敏感性与大气模式有关,其中,热带大气模式的 SST 误差最大,副极地冬季模式的 SST 误差最小.

2.3 对大气上下行辐射的敏感性分析

假定传感器观测的目标辐亮度、大气透过率和上行辐射不存在误差,设 $\Delta L_\lambda^\uparrow(\theta)$ 为上行辐射误差,则

$$L_\lambda(\theta) = \tau_\lambda(\theta)\varepsilon_\lambda(\theta)B_\lambda(T + \Delta T) + L_\lambda^\uparrow(\theta)$$

$$+ \Delta L_\lambda^\uparrow(\theta) + \tau_\lambda(\theta)[1 - \varepsilon_\lambda(\theta)]L_\lambda^\downarrow, \quad (13)$$

由式(3)和式(13)可知

$$\Delta T = B^{-1}\left[\frac{\Delta L_\lambda^\uparrow(\theta)}{\tau_\lambda(\theta)\varepsilon_\lambda(\theta)} + B_\lambda(T)\right] - T, \quad (14)$$

假定传感器观测的目标辐亮度、大气透过率和上行辐射不存在误差,设 $\Delta L_\lambda^\downarrow$ 为下行辐射误差,则

$$\Delta T = B^{-1}\left[\frac{1 - \varepsilon_\lambda(\theta)}{\varepsilon_\lambda(\theta)}\Delta L_\lambda^\downarrow + B_\lambda(T)\right] - T, \quad (15)$$

式中 B^{-1} 代表 Planck 公式的反函数.当比辐射率 0.98,温度 300 K 时,在 MODIS 反演大气温湿廓线的精度条件下,利用式(14)和式(15)计算五种大气模式的上下行辐射误差,可以发现它们导致 SST 的误差在 0.03 K 以内,说明单通道物理法对大气上行辐射或下行辐射的变化同样不敏感.

3 实验验证与分析

为了检验单通道物理法的精度,选择墨西哥湾附近海域进行实验,地理范围为 $22^\circ \sim 34^\circ\text{N}$, $78^\circ \sim 100^\circ\text{W}$. 该区域属热带气候,大气中水汽含量丰富, SST 梯度十分明显,适合验证单通道物理法的精度.实验数据为 2009 年全年的 MODIS 数据,浮标数据来自于美国国家数据浮标中心 (NDBC, <http://www.ndbc.noaa.gov>),共 48 个.各浮标的位置如图 5 所示,“▲”代表浮标的位置.

单通道物理法反演的 SST 与浮标数据的比对结果如图 6 所示.

图 6(a)、(b)和(c)分别为波长 3.7、11 和 12 μm 时,单通道物理法反演 SST 与浮标数据的比对结果.全年匹配数据点为 560 个.对比(a)、(b)、(c)可以发现,3.7 μm 的单通道物理法的 SST 反演误差(平均偏差 0.08 K,均方差 0.63 K)明显小于 11 μm (平均偏差 0.66 K,均方差 0.89 K)和 12 μm (平均

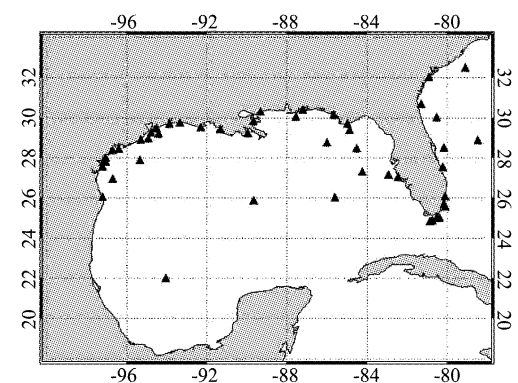


图 5 浮标数据的分布图
Fig. 5 The distribution of buoy data

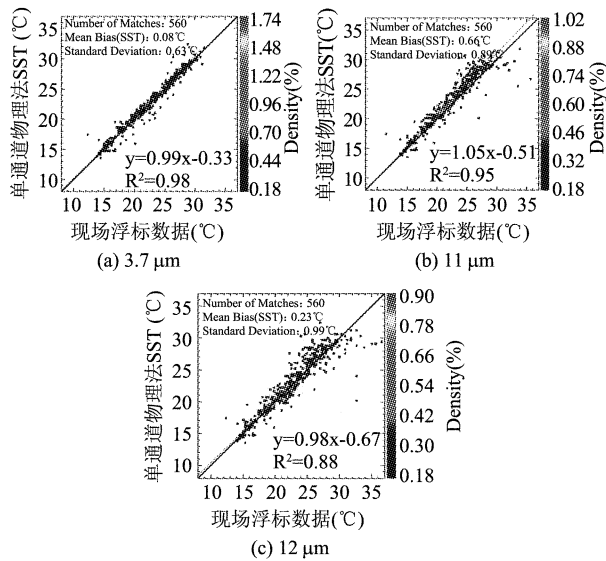


图6 单通道物理法 SST 与浮标数据的比对结果 (a) 3.7 μm (b) 11 μm (c) 12 μm

Fig. 6 Comparisons of SST retrieved from the single physical method with matched SST from buoys (a) 3.7 μm (b) 11 μm (c) 12 μm

偏差 0.23 K, 均方差 0.99 K) 的热红外波段, 这与参数敏感性分析的结果一致。11 μm 和 12 μm 的单通道物理法反演 SST 的精度高于表 2 给出的结果, 这是因为匹配数据点大气温湿廓线的实际误差小于表 2 使用的大气廓线误差 (温度误差为 4 K、湿度误差为 25%)。

MODIS 官方网站 (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>) 发布的 SST 产品与浮标数据的比对结果如图 7 所示。

平均偏差为 -0.07 K, 均方差为 0.56 K。对比图 6(a) 和 7 可知, 中红外波段的单通道物理法反演 SST 的精度与 MODIS SST 标准产品基本一致, 但由于单通道物理法反演的 SST 是海水表层温度, 而 MODIS SST 采用劈窗算法, 其系数由浮标在深度 0.3 ~ 1 m 处的测量温度拟合确定, 它更接近于现场浮标数据。

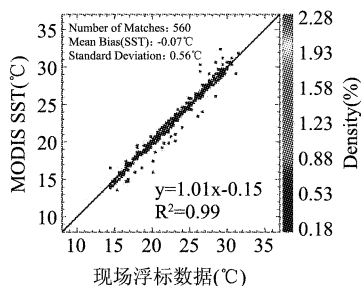


图7 MODIS SST 标准产品与浮标数据的比对结果

Fig. 7 Comparisons of MODIS SST from Official Website with matched SST from buoys

4 结论

单通道物理法是通过大气辐射传输模型求解 SST, 它需要像元尺度的海水比辐射率、大气上行辐射亮度、下行辐射亮度和大气透过率等参数作为输入, 反演精度受输入参数的误差影响。为了验证单通道物理法的可行性、精度及参数敏感性分析的结果, 选择了墨西哥湾海域 2009 年全年的 MODIS 夜间数据进行实验。实验表明, 中红外波段的单通道物理法反演 SST 的精度高于热红外波段, 达到 MODIS 利用劈窗算法反演的 SST 标准产品精度, 这与参数敏感性分析的结果一致。

中红外波段单通道物理法具有较高的精度, 可以满足海洋锋面、上升流、海洋涡旋等短周期海洋现象的观测需求, 为极轨或静止卫星海表温度反演提供新的技术手段。此外, 在现场观测站点稀少海域, 中红外波段单通道物理法反演的 SST 可替代现场浮标测量的水体温度, 用来标定劈窗算法系数, 该技术目前已应用到我国黄渤海区域的 SST 卫星遥感反演中^[8]。

REFERENCES

- [1] Li Xiao-Feng, Pichel W, Clemente-Colon P, *et al.* Validation of coastal sea and lake surface temperature measurements derived from NOAA/AVHRR data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, Vol. 22, No. 7: 1285 - 1303.
- [2] Akihiro U, Hiroshi F, Toshiro y. Estimate of sea surface temperature using infrared image data of geostationary meteorological satellite (GMS) [J]. *Meteorological Satellite Center Technical Note*, 1987, 15: 43 - 65.
- [3] Li Wan-Biao, Zhu Yuan-Jing, Zhao Bo-Lin. Study on sst in the northwestern pacific ocean with satellite observation [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (李万彪, 朱元竟, 赵柏林. 气象卫星遥感西北太平洋海温的研究. *气象学报*), 1977, 55 (1): 43 - 54.
- [4] Masuda K. Infrared sea surface emissivity including multiple reflection effect for isotropic gaussian slope distribution model [J]. *Remote Sensing of Environment*. 2006, 103: 488 - 496.
- [5] Wu X, Smith W L. Emissivity of rough sea surface for 8 ~ 13 μm : modeling and verification [J]. *Applied Optics*. 1997, Vol. 36, and No. 12: 2609 - 2619.
- [6] Chandrasekhar S. Radiative Transfer [M]. Oxford University Press, 1950.
- [7] ZHU Shan-You, ZHU Xun, YIN Qiu, *et al.* Modification of temperature and emissivity separation model and its sensitivity analysis [J]. *J. Infrared. Millim. Waves* (祝善友, 朱迅, 尹球, 等. 温度与发射率分离模型的改进及其敏感性分析. *红外与毫米波学报*), 2006, 25 (1): 71 - 76.
- [8] Li Zi-Wei, Yang Xiao-Feng. Towards operational monitoring of Bohai sea environment by satellite remote sensing [J]. *Chinese Journal of remote sensing* (李紫薇, 杨晓峰, 渤海环境遥感监测业务化应用技术, *遥感学报*), 2009, 13 (Sup.): 0427 - 0433.