

利用中红外数据反演海表温度的单通道算法^①

周 旋^{②*} 杨晓峰* 李紫薇* 程 亮**

(* 中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

(** 中国人民解放军 61741 部队 北京 100081)

摘要 基于中红外波段受大气水汽影响小的特点,从大气辐射传输的角度,提出了利用中红外数据反演海表温度的单通道算法。该算法适用于单通道的中红外数据,时空变化适应性强,对大气温湿廓线等辅助信息的精度要求较低。为了验证该算法的可行性和准确性,将此算法反演的海表温度产品与美国国家数据浮标中心提供的浮标数据及 MODIS SST 标准产品进行了比对验证。结果表明,此单通道算法反演的海表温度达到了较高的精度,能够满足海洋锋面、上升流、海洋涡旋等短周期海洋现象的观测需求。

关键词 中红外数据, 大气水汽, 海表温度(SST), 单通道

0 引言

海表温度(sea surface temperature, SST)是研究海气界面物质和能量交换的一个重要的物理参数。海水的热容量很大,通过海气相互作用,SST 的变化可影响大气参数、洋流运动及全球气候变化过程。传统 SST 数据的获取主要利用船只、浮标以及观测站的观测,难以实现大面积 SST 数据的同步获取,而利用卫星红外遥感数据可以高效快捷地获取大面积乃至全球尺度的 SST 资料,并且具有数据更新快、成本低等优点,已成为海温资料的主要数据来源。

利用卫星红外遥感技术反演 SST 的算法大致可以分为两类。一类是劈窗算法^[1],主要有通道 SST 算法、非线性 SST 算法^[2]和探索者 SST 算法^[3]等,精度小于 1K^[4,5],这些算法,采用分裂窗技术消除对流层水汽对大气辐射的影响,后来又考虑了气溶胶的影响^[6]。算法系数需要不断使用现场观测对卫星获取的 SST 进行标定,由此获取的 SST 是一个现场测量和卫星观测结果的综合数据^[7]。中分辨率成像光谱仪(MODIS)和先进的甚高分辨率辐射仪(AVHRR)的 SST 业务化算法采用的就是劈窗算法。劈窗算法参数少、运算量小,但区域适应性差,不同海域不同季节需要重新标定系数,且最少需

要传感器具备两个红外通道。另一类是单通道物理算法。该类算法利用大气辐射传输模式计算大气的上行辐射、下行辐射和透过率,并建立海水比辐射率与波长、传感器天顶角、风速的关系,最后将上述参数带入大气辐射传输方程求解 SST。该类算法时空变化适应性强,但反演精度受大气参数初始值影响较大。目前,由于实时获取准确的大气参数比较困难,针对该类算法的研究成果较少。中红外波段具有对水汽含量变化敏感性弱的特点,弥补了单通道物理算法受大气水汽影响大的不足,在 SST 反演方面,能够达到较高的精度。由于中红外波段受水汽影响比较小,对于只有单个红外通道的卫星传感器,可以利用其它卫星或模式提供的大气参数。本文通过分析红外波段对温度、水汽含量和气溶胶浓度等参数变化的敏感性,从大气辐射传输模型入手,提出了针对中红外波段反演夜间 SST 的单通道算法,并使用 MODIS 数据对算法进行了测试,最后利用定点浮标实测数据和 MODIS SST 标准产品对单通道算法 SST 反演结果进行了精度检验与误差分析。

1 中红外波段的特性分析

1.1 对温度变化的敏感性分析

在热平衡状态下,黑体的辐射亮度 L 可表示为

① 863 计划(2006AA09Z137)和国家海洋局“渤海环境立体监测与动态评价专项”(08Q0090034)资助项目。

② 男,1981 年生,博士,研究方向:海洋遥感;联系人,E-mail:youme_zx@163.com

(收稿日期:2010-06-01)

$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{h\nu kT} - 1} \quad (1)$$

其中, λ 表示波长; h ($= 6.6262 \times 10^{-34}$ J·s) 表示普朗克常数; k (1.3806×10^{-23} J/K) 表示玻尔兹曼常数; T 表示温度; c ($= 2.99793 \times 10^8$ m/s) 表示光速。

由式(1)可得, 黑体辐射亮度对温度变化的灵敏度^[18]为

$$\frac{1}{L} \frac{dL}{dT} = \frac{e^{h\nu kT} hc}{(e^{h\nu kT} - 1) k \lambda T^2} \quad (2)$$

图1展示了黑体温度为300K时, 辐射亮度对温度变化的灵敏度随波长的变化关系。由图1可以发现中红外波段对温度变化的灵敏度高于热红外波段, 例如, 波长为4μm时, 灵敏度为15.484%/K; 波长增加到11μm时, 灵敏度降低为5.418%/K。

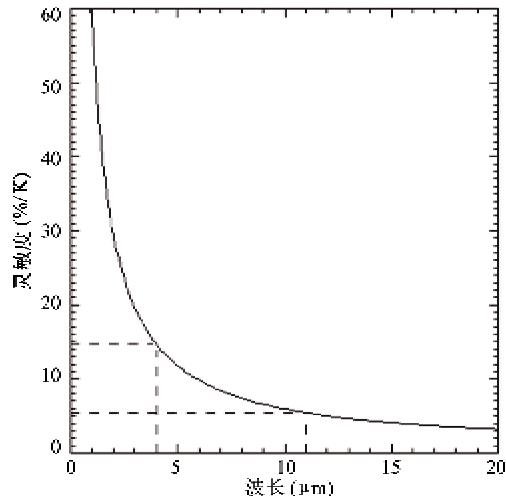


图1 黑体温度300K时辐射亮度随温度变化的灵敏度

1.2 对水汽含量变化的敏感性分析

在大气窗区, 水汽是对光学遥感探测影响最大的大气成分。利用MODTRAN程序^[19]模拟MODIS第20(3.660~3.840μm)、22(3.929~3.989μm)、23(4.020~4.080μm)、31(10.780~11.280μm)和32(11.770~12.270μm)波段(以下简称MODIS20、MODIS22、MODIS23、MODIS31和MODIS32)的垂直入射大气透过率与水汽含量间的变化关系。其中, 大气模式为1976年美国标准大气模式, 模拟结果如图2所示。

由图2可知, 随着大气中水汽含量的增加, 热红外波段的MODIS31和MODIS32的大气透过率迅速下降, 降幅达到了41%, 而中红外波段的MODIS22和MODIS23的大气透过率基本没有变化, MODIS20

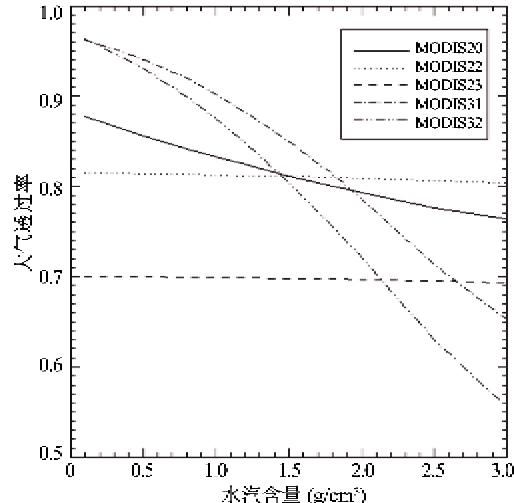


图2 水汽含量与大气透过率的变化关系

的大气透过率仅下降了12%, 表明水汽含量变化对中红外波段的影响很小。

1.3 对气溶胶浓度变化的敏感性分析

气溶胶对海表面辐射的消光作用是SST反演中需要考虑的问题。气溶胶浓度可以从垂直和水平两个方向加以描述, 分别对应着气溶胶光学厚度和水平气象视距这两个常用参量。考虑到MODTRAN采用后者作为输入参数, 本文对气溶胶浓度的描述使用水平气象视距。不同波长条件下, 气象视距与大气透过率的变化关系如图3所示。其中, 大气模式为1976年美国标准大气模式, 气溶胶类型为海洋型气溶胶。

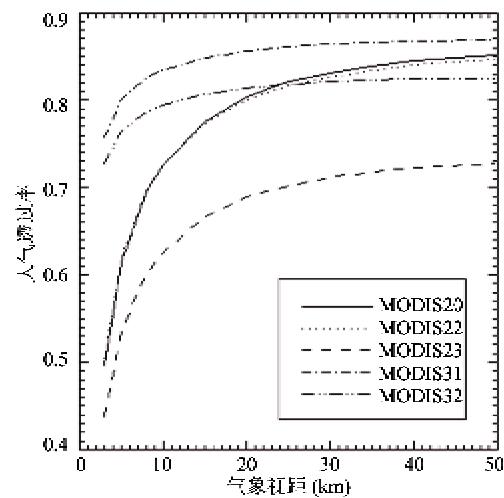


图3 气象视距与大气透过率的变化关系

由图3可知, 当气象视距大于20km时, MODIS20、22、31、32波段的大气透过率均在0.8左右,

而 MODIS23 的大气透过率偏低, 约为 0.7, 基本不随气象视距变化而变化; 当气象视距小于 20km 时, MODIS20、22、23 的大气透过率随气象视距减小而迅速下降。这说明当气象视距较大时, 中红外波段的大气透过率基本不随气溶胶浓度变化, 而当气象视距较小时, 其大气透过率随气溶胶浓度变化显著。

由上述的特性分析可知, 中红外波段对温度变化非常敏感, 而对水汽含量变化不太敏感, 且在一定的气象视距条件下, 受气溶胶浓度变化的影响也较小, 这使得中红外波段在夜间 SST 反演方面具有一定优势。

2 单通道算法模型

2.1 中红外辐射传输模型

在中红外波段, 由于受到大气散射、吸收和发射的影响, 卫星高度处的传感器接收到的辐射除了太阳和地表辐射信息以外, 还包括大气辐射的贡献。在晴空条件下, 对流层以下的大气可看作满足局地热平衡条件, 此时传感器接收的中红外辐射可表示为^[10]

$$\begin{aligned} R_i(\theta, \varphi) = & \int f_i(\lambda) \varepsilon_\lambda(\theta, \varphi) B_\lambda(T_s) t_\lambda(\theta, \varphi) d\lambda \\ & + \int \int f_i(\lambda) B_\lambda(T_p) \frac{\partial t_\lambda(\theta, \varphi, p)}{\partial p} dp d\lambda \\ & + \int f_i(\lambda) \int \int \rho_{b\lambda}(\theta, \theta', \varphi) L_{s\lambda}(\theta') \\ & \cdot t_\lambda(\theta, \varphi) \cos\theta' \sin\theta' d\theta' d\varphi' d\lambda \\ & + \int f_i(\lambda) \rho_{b\lambda}(\theta, \theta_s, \varphi) L_{sun,\lambda}(\theta_s, \varphi_s) \\ & \cdot t_\lambda(\theta_s, \varphi_s) t_\lambda(\theta, \varphi) d\lambda \end{aligned} \quad (3)$$

式中, R_i 表示传感器接收的总辐射亮度, $B_\lambda(T_s)$ 表示温度为 T_s 时的黑体辐射亮度, ε_λ 表示地表比辐射率, t_λ 表示整层大气的总透过率, $\rho_{b\lambda}$ 表示地表的双向反射率分布函数, $f_i(\lambda)$ 表示传感器第 i 通道的波段响应函数, θ, φ 分别表示传感器的天顶角和方位角, θ', φ' 分别表示大气下行辐射的天顶角和方位角, $L_{s\lambda}$ 表示大气的下行辐射亮度, $L_{sun,\lambda}$ 为太阳在大气顶层的辐射亮度, $t_\lambda(\theta_s, \varphi_s)$ 为大气在太阳光照射方向的透过率。

式(3)右边第 1 项表示地表热辐射经大气削弱后被传感器接收的热辐射亮度, 第 2 项表示大气上行辐射亮度, 第 3 项表示大气下行辐射经地表反射后受大气衰减最终被传感器接收到的辐射亮度, 第 4 项表示太阳辐射经过地表反射后被传感器接收到

的辐射亮度。

由于太阳辐射的影响, 在中红外波段反演 SST 多用于夜间 ($L_{sun,\lambda} = 0$), (3) 式可改写为以下形式:

$$\begin{aligned} R_i(\theta, \varphi) = & \int f_i(\lambda) \varepsilon_\lambda(\theta, \varphi) B_\lambda(T_s) t_\lambda(\theta, \varphi) d\lambda \\ & + \int \int f_i(\lambda) B_\lambda(T_p) \frac{\partial t_\lambda(\theta, \varphi, p)}{\partial p} dp d\lambda \\ & + \int f_i(\lambda) \int \int \rho_{b\lambda}(\theta, \theta', \varphi) L_{s\lambda}(\theta') \\ & \cdot t_\lambda(\theta, \varphi) \cos\theta' \sin\theta' d\theta' d\varphi' d\lambda \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)可知, 如果已知大气上行辐射亮度、下行辐射亮度、大气透过率和海水的比辐射率, 便可利用辐射传输方程计算出 SST。MODIS 传感器可反演大气温度廓线及露点温度, 为利用中红外波段反演 SST 提供必要的大气参数。由于中红外波段受水汽影响比较小, 对大气参数的精度要求较低, 也可以利用其它卫星或模式提供的大气参数。下面以 MODIS 数据为例, 说明中红外波段反演 SST 的单通道算法模型及流程。

2.2 单通道算法反演海表温度的模型

单通道算法反演 SST 所需的大气上行辐射亮度、下行辐射亮度和透过率, 主要与大气的温度、湿度垂直廓线及气溶胶光学厚度有关, 由于大气水汽在空间尺度上变化剧烈, 所需的大气廓线参数在空间尺度上要达到像元级。以上各大气参数均可通过 MODIS 数据反演获得, 然后将反演结果输入到大气辐射传输模式, 计算出每个像元的大气上行辐射亮度、下行辐射亮度和大气透过率, 并代入辐射传输模型, 求解 SST。大气辐射传输模式选择 MODTRAN, 该模式是由美国光谱科技公司、空军物理实验室联合使用 FORTRAN 语言编写的适用于计算 $0.2 \mu\text{m} \sim \infty$ 区间内的大气辐射传输模式。它是在 LOWTRAN 基础上改进的, 具有更高的光谱分辨率, 支持用户自定义大气模式和廓线的输入, 可以用来计算大气透过率、大气上行辐射和下行辐射。利用 MODIS 数据反演大气廓线、检测云, 已有成熟的算法, 并实现了业务化应用, 这里不再详细介绍, 在本文算法中直接使用这些产品。图 4 显示了单通道算法反演 SST 的流程。

海水的比辐射率随观测天顶角的增加而减小, 在垂直观测条件下, 海水的比辐射率为 0.99, 当观测天顶角增加到 65° (MODIS 的最大观测天顶角), 对应的比辐射率为 0.92。在中红外波段, Masuda 等^[11] 已经计算了风速为 0、3、5、10 和 15 m/s 条件下海水比辐射率与天顶角的函数关系, 由此建立比辐射率

与天顶角的查找表。

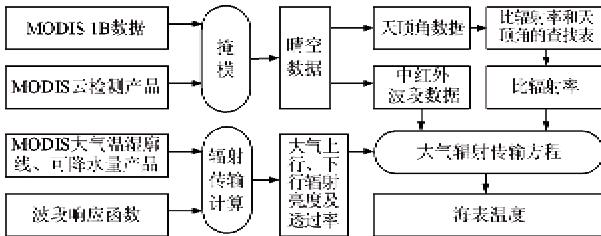
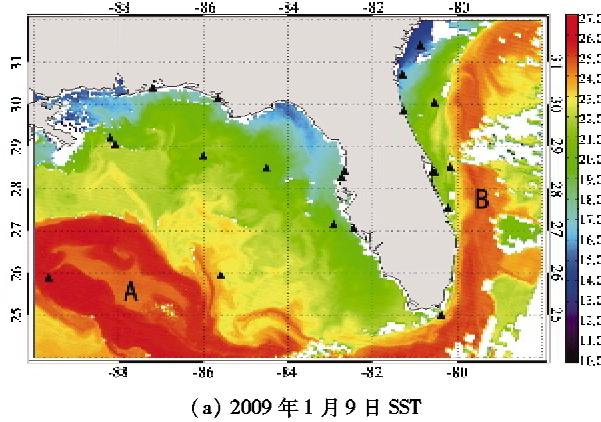


图 4 单通道算法反演 SST 的流程

3 单通道算法的精度与误差分析

为了检验中红外波段反演 SST 的单通道算法的可行性和准确性,选取美国佛罗里达州附近海域进

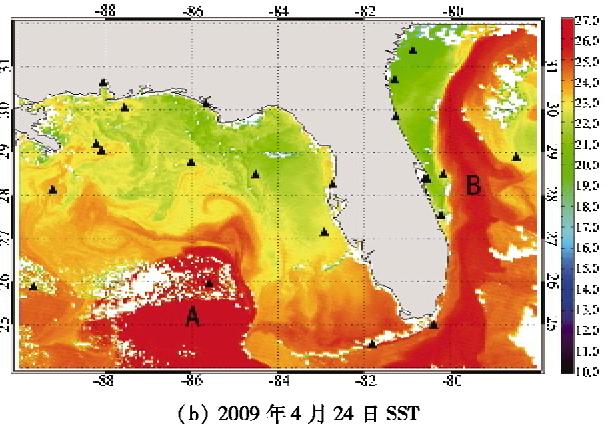


(a) 2009 年 1 月 9 日 SST

行精度验证,经纬度范围为 $24^{\circ} \sim 32^{\circ}\text{N}$, $78^{\circ} \sim 90^{\circ}\text{W}$ 。该区域属热带气候,水汽含量丰富,同时也是湾流的发源地和起始段,SST 梯度十分明显,适合检验算法的精度。

3.1 反演结果

由于云的影响,晴空 MODIS 像元通常只占整景图像的 10% 左右。通过对比,选取云量相对较少的两轨 MODIS 数据进行精度检验,成像时间分别为 2009 年 1 月 9 日和 2009 年 4 月 24 日。辐射传输计算软件选择的是 MODTRAN,大气模式为用户自定义,气溶胶模式为海洋型气溶胶,气象视距为默认值(23km)。中红外波段的数据选择的是 MODIS20 波段。单通道算法反演的 SST 结果如图 5 所示。



(b) 2009 年 4 月 24 日 SST

图 5(a) 和图 5(b) 分别为单通道算法反演的 2009 年 1 月 9 日和 2009 年 4 月 24 日的 SST,“A”表示湾流的发源地,“B”表示湾流的起始段,“▲”代表浮标的位置,白色代表云覆盖区域。从图 5 中可以清晰地发现湾流的发源地和起始段,它们与周围海域的 SST 的具有明显的差异。通过对比 1 月和 4 月的 SST 可以发现,湾流起始段的流轴基本不变,而湾流的发源地在 1 月份向西北方向移动,平均温度偏低,在 4 月向东南方向移动,平均温度高于 1 月份,这与常年观测的结果一致。

3.2 精度检验

利用美国国家数据浮标中的浮标和 MODIS SST 标准产品检验本文算法反演的 SST 产品的精度。各浮标位置如图 5 的“▲”所示,其中,图 5(a)匹配的有效浮标数据点为 21 个,图 5(b)匹配的有效浮标数据点为 22 个。

由表 1 可知,单通道算法反演 SST 的平均偏差(单通道算法 SST 与浮标数据之差的平均值)为负,

略低于浮标数据值,而标准方差小于 0.5K ,达到了较高的精度。由于匹配浮标数据点有限,为了有效地检测算法的精度,将单通道算法反演的 SST 与同区域同时次的 MODIS SST 标准产品对比,匹配数据点选择 MODIS SST 产品中质量标准最高(即 qual_sst4 = 0)^[12]的数据点,比对结果如图 6 所示。

MODIS SST 标准产品精度为 0.4°C (夜间)^[13],与单通道算法反演的两幅 SST 的匹配数据点分别为 492609 和 533584,二者的平均偏差(MODIS SST 与

表 1 单通道算法反演 SST 与 MODIS SST 的误差对比

(单位:K)

精度指标	2009 年 1 月 9 日		2009 年 4 月 24 日	
	MODIS SST	单通道算法 SST	MODIS SST	单通道算法 SST
平均偏差	0.08	-0.34	0.14	-0.14
标准方差	0.55	0.36	0.45	0.47

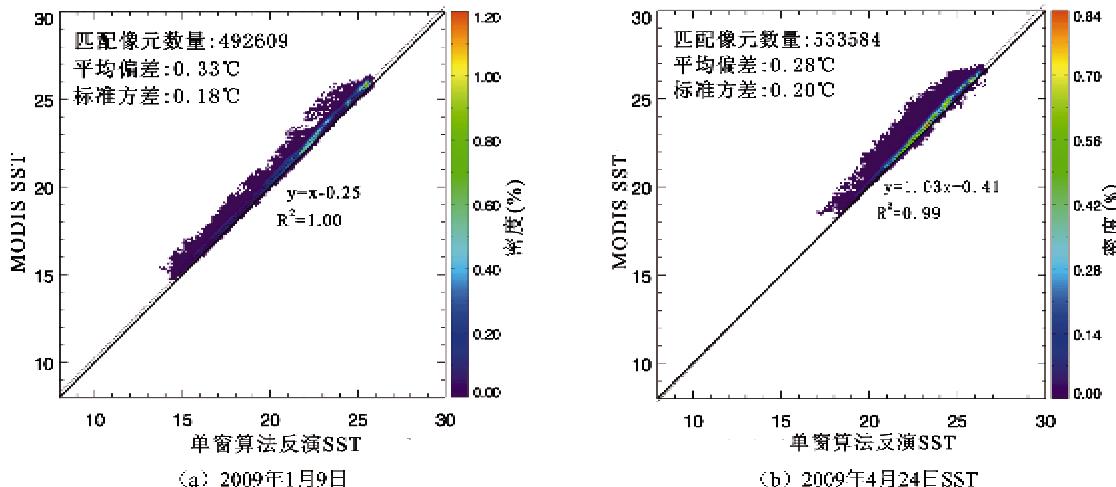


图6 单通道算法反演 SST 与 MODIS SST 比对结果

单通道算法 SST 之差的平均值)分别为 0.33°C 和 0.28°C , 标准方差分别为 0.18°C 和 0.20°C , 相关系数分别为 1.00 和 0.99, 最小二乘法拟合直线的斜率分别为 1.00 和 1.03。

通过与浮标数据和 MODIS SST 标准产品的比对可知, 利用中红外波段反演 SST 的单通道算法达到了较高的精度。

3.3 误差分析

影响反演精度的因素分析如下:

(1) 云检测算法是 SST 反演的关键技术之一,直接影响着单通道算法的精度。由于云检测算法的精度有限, 图 5(a) 和 (b) 的右上角均有一些低温像元, 与周围像元明显不一致。

(2) 浮标测量的是海面以下 $0.3 \sim 1\text{m}$ 处的温度, 而利用中红外波段反演的夜间 SST 是海面几 μm 薄层出射的辐射温度, 二者存在一定差异, 由于蒸发和辐射的冷却作用, 通常要比浮标测量的水体温度低, 这与表 1 的结果是一致的。

(3) MODTRAN 在计算大气辐射和透过率时, 误差随着天顶角的增加而增加, 对反演的精度有一定的影响。

4 结 论

中红外波段受水汽含量变化的影响较小, 在夜间 SST 反演方面, 具有独特的优势。本文分析了中红外波段数据对温度变化、大气水汽含量变化、气溶胶浓度变化的敏感性, 然后从辐射传输模型的角度, 提出了利用中红外波段反演 SST 的单通道算法。它具有准确度高且时空变化适应性强的特点, 弥补了

单通道物理法受大气参数影响大的不足。为验证算法的可行性和准确性, 选择了美国佛罗里达州附近的海域进行实验, 该区域水汽含量丰富、海温梯度大, 是测试 SST 反演算法的理想区域。通过与现场数据和 MODIS SST 业务化产品比对可以发现, 单通道算法反演的 SST 与浮标实测值的标准方差低于 0.5°C , 与 MODIS SST 的标准方差低于 0.2°C , 达到了较高的精度, 能够满足海洋锋面、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。

参考文献

- [1] McClain E P, Pichel W G, Walton C C. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90 (C6): 11587-11601
- [2] Walton C C, Pichel W G, Sapper J F, et al. The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with the NOAA polar-orbiting environmental satellites. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103 (C12): 27999-28012
- [3] Kilpatrick K A, Podesta G P, Evans R. Overview of the NOAA/NASA advanced very high resolution radiometer pathfinder algorithm for sea surface temperature and associated matchup database. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 9179-9197
- [4] Li X F, Pichel W, Maturi E, et al. Deriving the operational nonlinear multi-channel sea surface temperature algorithm coefficients for NOAA-15 AVHRR/3. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(4): 699-704

- [5] Li X F, Pichel W, Clemente-Colon P, et al. Validation of coastal sea and lake surface temperature measurements derived from NOAA/AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(7) : 1285-1303
- [6] Nalli N R, Stowe L L. Aerosol correction for remotely sensed sea surface temperatures from the national oceanic and atmospheric administration advanced very high resolution radiometer. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107 (C10), 3172, doi:10.1029/2001JC001162
- [7] Martin S. An Introduction to Ocean Remote Sensing. London: Cambridge University Press, 2004. 156-181
- [8] Stewart R H. Method of Satellite Oceanography. Los Angeles: University of California Press, 1985. 101-112
- [9] 吴北婴,李卫,陈洪滨等.大气辐射传输实用算法. 北京:气象出版社,1998. 19-24
- [10] 田国良. 热红外遥感. 北京:电子工业出版社,2006. 19-24
- [11] Masuda K, Takashima T, Takayama Y. Emissivity of pure and sea waters for the model sea surface in the infrared window regions. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 24(2) :313-329
- [12] Franz, B. Implementation of SST Processing within the OBPG. OceanColor Documents, 2006
- [13] Brown O B, Evans R H, Minnett P J, et al. Sea surface temperature measured by the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS). In: Proceedings of the Presentation at MODIS Internal Working Group (IWG) Meeting, Miami, USA, 2002

A mono-window algorithm for retrieving sea surface temperatures by using mid-infrared data

Zhou Xuan * ** , Yang Xiaofeng * , Li Ziwei * , Cheng Liang **

(* Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

(** 61741 Troops of PLA, Beijing 100081)

Abstract

Based on the knowledge that atmospheric water vapor has less contribution to the energy received by satellite radiometers in the mid-infrared (IR) band than in the long IR band, this paper proposes a mono-window algorithm for the sea surface temperature (SST) retrieval using the mid-IR band data, which comes from the perspective of atmospheric radiative transfer. The algorithm has the low requirement for the accuracy of atmospheric profiles and has the strong ability to adapt to the space-time change. In order to verify the feasibility and accuracy of this algorithm, the derived SST products were compared with that from both the NOAA National Data Buoy Center (NDBC) buoy measurements and the MODIS SST retrieval. The results show that the algorithm has the relative good precision and the SST products meet the needs of ocean front, upwelling, ocean eddy and other ocean phenomena detections.

Key words: mid-infrared data, water vapor, sea surface temperature (SST), mono-window algorithm