

风云三号传感器红外通道海表比辐射率模拟

蒋耿明^{①, ②}

(^① 复旦大学波散射与遥感信息教育部重点实验室, 上海 200433;

^② 北京师范大学, 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 海表比辐射率(SSE)是从卫星被动遥感数据反演海表温度(SST)的关键参数之一, 本文讲述了利用 Wu and Smith (1997) 发展的 SSE 模型, 对搭载在风云三号(FY-3A)上的红外大气探空仪(IRAS)第8(12.47 μ m)、9(11.11 μ m)、19(3.98 μ m)和20(3.76 μ m)波段, 中分辨率光谱成像仪(MERSI)第5波段(11.54 μ m), 可见光红外扫描辐射计(VIRR)第3(3.65 μ m)、4(11.00 μ m)和5(12.13 μ m)波段的 SSE 进行模拟计算。模拟结果表明, SSE 是观测角度、波长和海表粗糙度(海面风速)的函数。模拟值与 IRAS、MERSI 和 VIRR 红外通道波谱响应函数进行卷积计算得到波段 SSE。在观测角度小于 60°时, 波段 SSE 对海面风速不敏感, 使用风速为 8m/s 的 SSE 替代其他风速条件下的 SSE 所引起的误差小于 0.5%。另外, 使用波段 SSE 计算卫星观测值所导致的误差不超过 0.05K, 可以忽略不计。波段 SSE 随观测角度变化的规律可以用高斯函数进行描述, 拟合误差小于 0.02%, 相关系数为 1.000。本文的模拟结果可以用于 SST 的精确反演。

关键词: FY-3A 传感器; 红外窗口通道; 海表比辐射率模拟

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.02.001

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2011)114-0003-06

Modeling of Sea Surface Emissivity in the Infrared Window Channels of FY-3A Instruments

JIANG Geng-Ming^{①, ②}

(^① Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information, (MOE), Fudan University, Shanghai 200433;

^② State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract: Sea Surface Emissivity (SSE) is one of the key parameters to retrieve Sea Surface Temperature (SST) from satellite passive remote sensing data. This paper addressed the simulations of SSEs in the InfraRed Atmospheric Sounder (IRAS) channels 8 (12.47 μ m), 9 (11.11 μ m), 19 (3.98 μ m) and 20 (3.76 μ m), the Visible and InfraRed Radiometer (VIRR) channels 3 (3.65 μ m), 4 (11.00 μ m) and 5 (12.13 μ m), and the Medium Resolution Spectral Imager (MERSI) channel 5 (11.54 μ m) aboard the Chinese second generation meteorological satellite FengYun 3A (FY-3A) using the SSE model developed by Wu and Smith in 1997. The results verify that SSE is a function of Viewing Zenith Angle (VZA), wavelength and wind speed (sea surface roughness). The channel-averaged SSEs were obtained through the convolution of the modeled SSEs with the spectral response functions of IRAS, VIRR and MERSI imagers. When VZA is less than 60°, the channel-averaged SSEs are not sensitive to wind speed, and the total errors introduced by the SSE modeling and the use of SSEs at 8m/s for any other wind speed are less than 0.5%. Radiative transfer modeling results reveal that the errors in the simulated brightness temperature at top-of-at-

收稿日期: 2010-03-09

基金项目: 遥感科学国家重点实验室开放基金(2009KFJ018)、复旦大学青年科学基金(08FQ06)和国家自然科学基金(40901158)共同资助。

作者简介: 蒋耿明(1975~), 男, 副教授, 主要研究领域为定量遥感和遥感图像处理。

E-mail: jianggm@fudan.ac.cn

osphere introduced by the channel-averaged SSEs is not greater than 0.05 K, which can be neglected completely. The variation of the channel-averaged SSEs with VZA can be accurately described by Gaussian function, and the fitting standard deviations are less than 0.02% and the correlation coefficients are equal to 1.000. The simulated channel-averaged SSEs in this work satisfy the requirement of accurate SST retrieval.

Key words: FY-3A instruments; infrared window channels; sea surface emissivity modeling

1 引言

海表比辐射率(Sea Surface Emissivity, SSE)是从卫星被动遥感数据反演海表温度(Sea Surface Temperature, SST)的关键参数之一。为了得到精度0.3K的SST, SSE的误差应小于0.5%^[1](Wu and Smith, 1996)。在早期的SST反演算法中,一般把SSE率当作一个常量^[2](Anding and Kauth, 1970)。近几年的研究表明, SSE不仅依赖于波长,而且也取决于观测角度和海表粗糙度(海面风速)。因此,迫切需要发展一个能精确描述SSE变化规律的模型,以便提高SST的反演精度。Masuda et al. (1988)根据复数形式的斯涅耳定律和菲涅耳公式发展出一个海表比辐射率模型,该模型考虑了海水盐分浓度对海水折射率的影响以及波浪之间的遮蔽效应^[3]; Wu and Smith(1997)研究发现,当观测角度较大时, Masuda等人的模型的模拟值与实测值存在较大的差异^[4]。在Masuda等人模型的基础上, Wu and Smith(1997)在模型中加入了海表的多次反射,并采用了合适的海水复折射率,改进后的模型计算值与实测数据非常吻合^[4]。风速或海表粗糙度, SSE模型的输入参数之一,虽然可以通过实测或用微波散射计反演获取^[5](周良明等, 2006),但是与卫星观测相匹配的数据一般不容易得到,这阻碍

了SSE模型的广泛应用。

风云三号(FengYun 3A, FY-3A)是中国自主研制的第二代极轨气象卫星,共搭载了11种对地观测仪器,其中包括红外大气探空仪(InfraRed Atmospheric Sounder, IRAS)、中分辨率光谱成像仪(Medium Resolution Spectral Imager, MERSI)和可见光红外扫描辐射计(Visible and InfraRed Radiometer, VIRR)。IRAS、MERSI和VIRR传感器均垂直于卫星轨迹对地进行扫描。IRAS传感器拥有26个波段通道,覆盖了可见光、近红外和红外,其中通道8(12.47 μ m)、9(11.11 μ m)、19(3.98 μ m)和20(3.76 μ m)是4个红外窗口通道,其星下点空间分辨率是17km。MERSI有20个波段,其中红外波段只有第5波段(11.54 μ m),其星下点空间分辨率是250m。VIRR传感器有10个波段,其中第3(3.65 μ m)、4(11.00 μ m)和5(12.13 μ m)是3个红外窗口波段,其星下空间分辨率是1.1km。IRAS、MERSI和VIRR传感器的对地观测角度最大值约为60°。表1列出了上述8个波段的参数值,而图1则显示相应的波谱相应函数。值得注意的是VIRR传感器第3波段和MERSI第5波段比其他的波段宽一些。

本文将主要讲述IRAS、MERSI和VIRR红外窗口波段SSE模拟,分为模拟方法、模拟和分析以及总结和结论等3个部分。

表1 风云三号IRAS、MERSI和VIRR传感器红外窗口波段的光谱特性

Instrument	no.	λ_c^* (μ m)	NE Δ T at 300K (K)	Maximum limit (K)	Spatial resolution at nadir (km)
IRAS	8	12.47	0.11	330	17.0
	9	11.11	0.12	330	17.0
	19	3.98	0.07	340	17.0
	20	3.76	0.07	340	17.0
MERSI	5	11.54	0.4	330	0.25
VIRR	3	3.65	0.3	350	1.1
	4	11.00	0.2	330	1.1
	5	12.13	0.2	330	1.1

注: 中心波长 $\lambda_c = \int_0^\infty \lambda f(\lambda) d\lambda / \int_0^\infty f(\lambda) d\lambda$, 其中 λ 是波长, $f(\lambda)$ 是波谱响应函数; NE Δ T 是噪声等效温差。

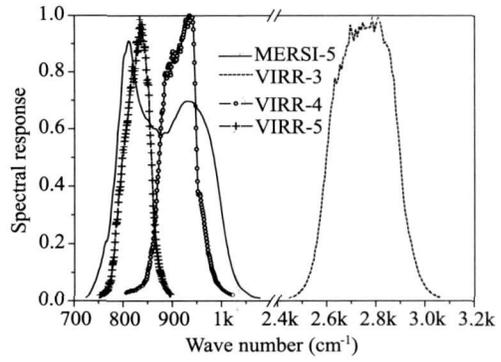
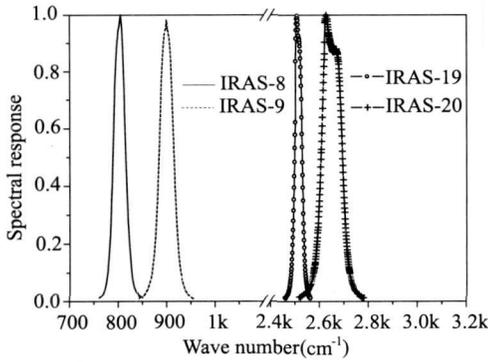


图1 风云三号 IRAS、MERSI 和 VIRR 传感器红外窗口波段的光谱响应函数

2 模拟方法

根据基尔霍夫定律, SSE 是海表半球- 方向反射率的补集:

$$\varepsilon(n, \theta) = 1 - \rho(n, \theta) \quad (1)$$

其中, n 是海水复折射率, θ 是入射角, ρ 是反射率。

对于非极化光谱, 反射率 ρ 可以用平均值简单地表示

$$\rho(n, \theta) = \frac{|\rho_p|^2 + |\rho_s|^2}{2} \quad (2)$$

$$\rho_p = \frac{n \cos \theta - \cos \theta'}{n \cos \theta + \cos \theta'} \quad (3)$$

$$\rho_s = \frac{\cos \theta - n \cos \theta'}{\cos \theta + n \cos \theta'} \quad (4)$$

$$\sin \theta' = (\sin \theta) / n \quad (5)$$

其中, ρ_p 和 ρ_s 分别是两个极化方向反射电磁波的幅值, θ' 是折射角。

公式 (1) 和 (2)、(3)、(4)、(5) 表明水平海水的 SSE 仅取决于海水复折射率和观测角度。由于海风等因素的存在, 海表实际上是一个粗糙海面。对于粗糙海表, 当观测角度较大时, 公式 (1) 和 (2) 的计算值与测量值不符^[4] (Wu and Smith, 1997)。在 Masuda 等人 (1988) 的 SSE 模型基础之上, Wu and Smith (1997) 发展的 SSE 模型不仅考虑了海表粗糙度和波浪之间的遮蔽效应, 而且考虑了波浪之间的多次反射, 模型模拟值与实测值较吻合^[4]。下面将简单地介绍 Wu and Smith 的模型。

假设粗糙海面的波浪服从正态随机分布, 其概率密度函数是^[6] (Cox and Munk, 1954)

$$P(z_x, z_y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{z_x^2 + z_y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

其中, Z_x 和 Z_y 分别是平行于和垂直于风向的坡度, 均方坡度 σ^2 可以表示成风速的函数:

$$\sigma^2 = (0.003 + 0.00512 \times W) / 2 \quad (7)$$

其中, W 为 12.5m 高度的海风风速, 单位是 m/s。经过复杂的运算, SSE 表示为:

$$\bar{\varepsilon}(n, \mu_e) = \frac{1}{\pi\sigma^2 \mu_e} \int_0^\pi \int_0^\pi \varepsilon(n, x) \mu_n^4 \cos x \exp\left(-\frac{\tan^2 \theta_n}{2\sigma^2}\right) d\varphi d\mu_n, \cos x > 0 \quad (8)$$

其中, $\mu_e = \cos \theta_e$, $\mu_n = \cos \theta_n$, θ_n 和 φ 分别表示天顶角和方位角, θ_e 是辐射天顶角 (如图 2 所示)。

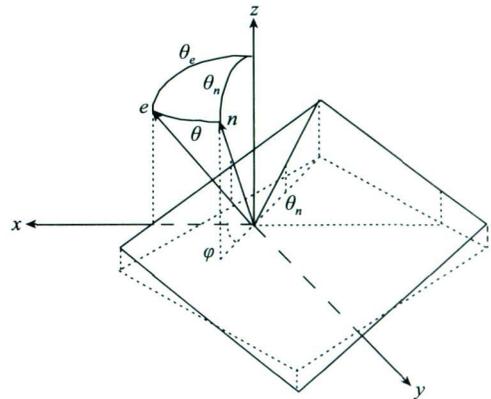


图2 波面观测角度之间的几何关系

根据球面三角余弦定律, θ 与 μ_e , μ_n 和 φ 有如下关系:

$$\cos \theta = \mu_e \mu_n + (1 - \mu_e^2)^{1/2} (1 - \mu_n^2)^{1/2} \cos \varphi \quad (9)$$

为了消除海表波浪之间的遮蔽效应, 需要对海表比辐射率进行归一化处理^[3-4,7] (Saunders, 1967; Masuda et al., 1988; Wu and Smith, 1997)

$$\bar{\varepsilon}(n, \mu_e) = \bar{\varepsilon}(n, \mu_e) / \sum(\mu_e) \quad (10)$$

$$\sum(\mu_e) = \frac{1}{\pi\sigma^2 \mu_e} \int_0^\pi \int_0^\pi \mu_n^4 \cos x \exp\left(-\frac{\tan^2 \theta_n}{2\sigma^2}\right) d\varphi d\mu_n, \cos x > 0 \quad (11)$$

除了海表粗糙度和波浪遮蔽效应, 波浪之间的多次反射也必须加以考虑^[4] (Wu and Smith, 1997)。对于海表的任一点, SSE 用下式进行修正

$$\varepsilon(n, \theta) = \varepsilon(n, \theta) + [1 - \varepsilon(n, \theta)] P(\theta) \bar{\varepsilon}(n, \mu_e) \quad (12)$$

$$P(\theta) = \begin{cases} 1, & \theta > 90^\circ \\ 1 - (\theta - 85^\circ)^2 / 25, & 85^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \\ 0, & \theta < 85^\circ \end{cases} \quad (13)$$

$P(\theta)$ 是从海表反射的辐射到达该点的概率密度函数, $\mu = \cos(\pi - \theta)$, $\cos\theta = 2\cos\alpha\cos\theta_0 - \cos\theta_k$ 。

用公式(12)、(13)修正后的海表比辐射率替换公式(8)中的 $\varepsilon(n, x)$, 通过一定次数的迭代得到 SSE。研究表明一次迭代就可以得到足够精确的结果^[4] (Wu and Smith, 1997)。

上面介绍的是 Wu and Smith 的 SSE 模型。

为了得到 FY-3A 传感器红外波段 SSE, 上述模拟结果需与 FY-3A 传感器的波段响应函数(图 1)进行卷积计算, 即

$$\varepsilon_{s,i}(\theta) = \int_{v_1}^{v_2} f_{s,i}(v) \tilde{\varepsilon}(n, \theta) dv / \int_{v_1}^{v_2} f_{s,i}(v) dv \quad (14)$$

其中, $\varepsilon_{s,i}(x)$ 表示 FY-3A 传感器 s 第 i 波段的海表比辐射率 ($s = \text{IRAS, MERSI 或 VIRR}$), $f_{s,i}(\lambda)$ 为传感器 s 第 i 波段在波数 v 处的响应。

3 结果和分析

海水复折射率是 SSE 模型的关键参数。Wu and Smith(1997) 研究表明, 海水复折射率的实部采用 Hale and Querry^[8] (1973) 的测量值, 而虚部采用 Segelstein^[9] (1981) 的测量值, 并用 Friedman^[10] (1969) 的测量数据进行调整, 所得到的模拟结果最符合测量值, 因此本文也采用这种经过调整的复折射率。复折射率随波数变化的曲线绘制在图 3 中。FY-3A 传感器的热红外波段位于两条蓝色虚线之间, 而中红外波段位于两条红色虚线之间。热红外波段复折率先随波数减小后增加, 变化剧烈, 而中红外波段复折射率随波数缓慢增加。

我们用 C 语言实现了上述算法并进行了模拟计算。图 4 和图 5 分别显示在风速为 0m/s、2m/s、4m/s、8m/s 和 16m/s 条件下热红外波段和中红外波段 SSE 的模拟结果。图 4 和图 5 验证了 SSE 不是一个固定的常数, 其大小依赖于波长、观测角度和海表粗糙度(海面风速)。当观测角度从 0° 变化到 89° 度时, SSE 从接近 1.0 减小到 0.3 以下。在相同的风速和观测角度条件下, 热红外波段的比辐射率一般比中红外波段的比辐射率大。当风速从 0m/s 变化至 16m/s 时, 即海表粗糙度增大时, 海表比辐射率随观测角度的衰减率变小, 也就是说粗糙度会使 SSE 增大。模拟结果与以前的研究结果基本一致^[4,11] (Wu and Smith, 1997; Nicl s et al., 2005)。

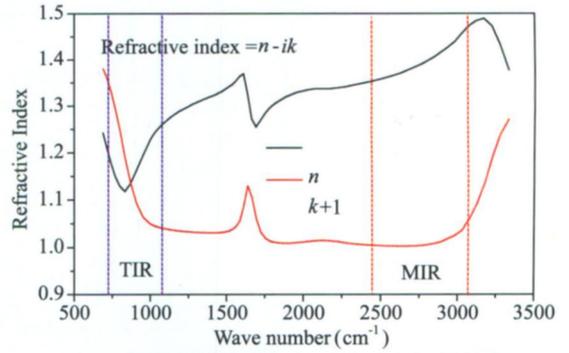


图 3 根据典型海水调整过的纯水复折射率随波数的变化情况 (盐分浓度: 34. 3ppt, 氯含量浓度: 19. 0ppt; TIR 表示热红外, 而 MIR 代表中红外)

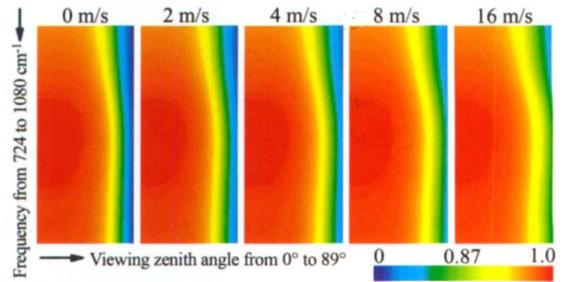


图 4 风速分别为 0m/s、2m/s、4m/s、8m/s 和 18m/s 条件下的热红外波段 SSE 模拟值

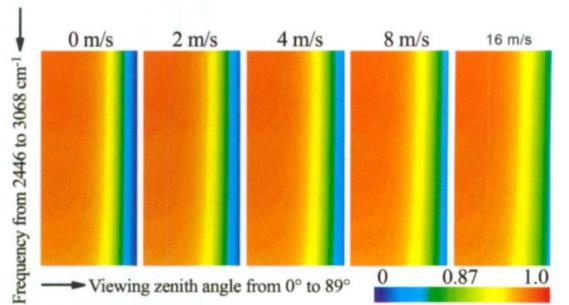


图 5 风速分别为 0m/s、2m/s、4m/s、8m/s 和 18m/s 条件下的中红外波段 SSE 模拟值

根据公式(14), 模拟 SSE 与 FY-3A 传感器波段响应函数卷积得到波段 SSE。同理, 波段 SSE 也是波长、观测角度和风速的函数。风速需要借助其他方法测量或反演, 不利于 SSE 模型的广泛应用。本文计算了在各种风速条件下波段 SSE 最大值与最小值之差的绝对值 (Absolute Maximum Minimum Difference of Emissivity, $|\Delta MME|$) 以及风速为 8m/s 条件下的 SSE 与其他条件下 SSE 差的绝对值 (Absolute Difference between SSE at Eight m/s and at Other wind speed, $|\Delta EOE|$), 并绘制在图 6(a) 和 6(b) 中。 $|\Delta MME|$ 一般大于 $|\Delta EOE|$, 其差值随观测角度的增大而迅速增大。当观测角度小于 60° 时, SSE 对风速不敏感, 所有的绝对差值均小于 0.5%。因此, 当观测角度小于 60° 时, 采用 8m/s

条件下的 IRAS、MERSI 和 VIRR 红外波段 SSE 满足精确反演 SST 的要求。风速 8m/s 条件下的 IRAS、MERSI 和 VIRR 红外波段 SSE 随观测角度的变化规律绘制在图 6(c) 和 6(d) 中。当观测角度小于 30° 时, 波段 SSE 几乎不随观测角度变化; 当观测角度大于 35° 时, 波段 SSE 对观测角度比较敏感, 波段 SSE 随观测角度的增大而迅速变小。以 IRAS 第 8 波段为例, 当观测角度从 0° 变化至 60° 时, SSE 从 0.983 变化至 0.931。

如前文所述, VIRR 传感器第 3 波段和 MERSI 传感器第 5 波段比较宽。Jiang et al. (2006) 研究表明, 简化的辐射传输方程应用到宽波段时会导致较大的误差^[12]。下面, 我们对波段 SSE 在数值计算卫星观测中的影响进行了评估。

根据辐射传输理论, 在晴空条件下, 卫星传感器 s 第 i 波段观测值为:

$$L_{s,i}(\theta, T_{s,i}) = \frac{\int_0^\infty f_{s,i}(v) \tau(\theta, v) L_G(\theta, T_{g,s,i}, v) dv}{\int_0^\infty f_{s,i}(v) dv} + \frac{\int_0^\infty f_{s,i}(v) L_{atm\uparrow}(\theta, v) dv}{\int_0^\infty f_{s,i}(v) dv} \quad (15)$$

表 2 使用公式(17)所引起的大气顶亮温计算最大误差

	IRAS-8	IRAS-9	IRAS-19	IRAS-20	MERSI-5	VIRR-3	VIRR-4	VIRR-5
$ \Delta T _{\max}$ (Kelvin)	0.02	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	0.00	0.03

为了方便应用, 我们用如下的高斯函数对风速为 8m/s 条件下的波段 SSE(图 6(c)和 6(d))进行了拟合:

$$\varepsilon(\theta) = y_0 + \frac{A}{\omega \sqrt{0.5\pi}} \exp\left\{-2\left[\frac{\theta - \theta_c}{\omega}\right]^2\right\} \quad (18)$$

其中, y_0 、 A 、 ω 和 θ_c 为未知参数。

本文采用 Levenberg-Marquardt 最小二乘方法对风速为 8m/s 的波段 SSE 用公式(18)进行拟合,

表 3 根据风速为 8m/s 的波段 SSE 拟合得到的公式(18)的参数值

Channel	y_0	θ_c	ω	A	Stdev*	R^2
IRAS-8	0.9835±0.0000	118.4916±0.4490	52.6920±0.6253	-39.0181±0.9484	0.0001	1.000
IRAS-9	0.9922±0.0000	123.0885±0.3094	51.9688±0.31862	-35.8418±0.6339	0.0001	1.000
IRAS-19	0.9768±0.0000	121.5244±0.0085	54.2330±0.8496	-38.6090±0.9852	0.0001	1.000
IRAS-20	0.9750±0.0000	121.7466±0.9810	54.5156±0.8390	-39.4501±0.9920	0.0001	1.000
VIRR-3	0.9737±0.0001	153.3163±0.7514	67.3257±0.3387	-178.6154±0.3159	0.0002	1.000
VIRR-4	0.9918±0.0001	154.2717±0.9397	63.1201±0.3965	-200.1050±0.3036	0.0001	1.000
VIRR-5	0.9873±0.0001	144.6544±0.6044	62.5504±0.2868	-132.6002±0.3006	0.0001	1.000
MERSI-5	0.9888±0.0000	153.6299±0.7215	65.1116±0.3149	-189.4108±0.7158	0.0001	1.000

注: * Stdev 代表标准方差

其中, $T_{s,i}$ 是大气顶亮温, $\tau(\theta, v)$ 是大气透过率, $T_{g,s,i}$ 是地表亮温, $L_{atm\uparrow}(\theta, v)$ 是大气上行辐射, $L_G(\theta, T_{g,s,i}, v)$ 是地表波谱辐射值

$$L_G(\theta, T_{g,s,i}, v) = \varepsilon(\theta, v)L(T_s, v) + [1 - \varepsilon(\theta, v)]L_{atm\uparrow}(\theta, v) + \rho_b(\theta, \theta_s, \varphi_s, v)E_{sun}(v) \quad (16)$$

其中, T_s 是地表物理温度, $L(T_s, v)$ 是普朗克函数, $L_{atm\uparrow}(\theta, v)$ 是大气下行辐射, θ_s 是太阳天顶角, φ_s 是相对方位角, $\rho_b(\theta, \theta_s, \varphi_s, v)$ 是二向反射率, $E_{sun}(v)$ 是地表太阳直射辐射。对于夜晚, $E_{sun}(v) = 0$ 。

当我们使用波段 SSE 代替波谱 SSE 时, 方程(16)简写成

$$L_G(\theta, T_{g,s,i}, v) = \varepsilon(\theta)L(T_s, v) + [1 - \varepsilon(\theta)]L_{atm\uparrow}(\theta, v) + \rho_b(\theta, \theta_s, \varphi_s, v)E_{sun}(v) \quad (17)$$

我们做了一个简单的数值实验来评估波段 SSE 对计算结果的影响。假设在晴朗的夜晚, 地表温度是 300K, 观测角度是 45°, 大气模式分别是 Tropical、MLS、MLW、SAS 或 SAW, 我们分别使用方程(16)和(17)计算了卫星观测值, 结果列举在表 2 中。对所有的波段来说, 波段 SSE 所引入的最大误差为 0.05K, 比 $NE\Delta T$ 还小, 因此可以忽略不计。

参数值列举在表 3 中。表 3 显示, 高斯拟合的最大标准方差为 0.02%, 相关系数为 1.000, 因此, 使用公式(18)所产生的误差可以忽略不计。

综上所述, 当观测角度小于 60° 时, 使用 8m/s 条件下的 SSE 模拟值所引起的总误差小于 0.5%, 能够满足精确反演 SST 的要求。

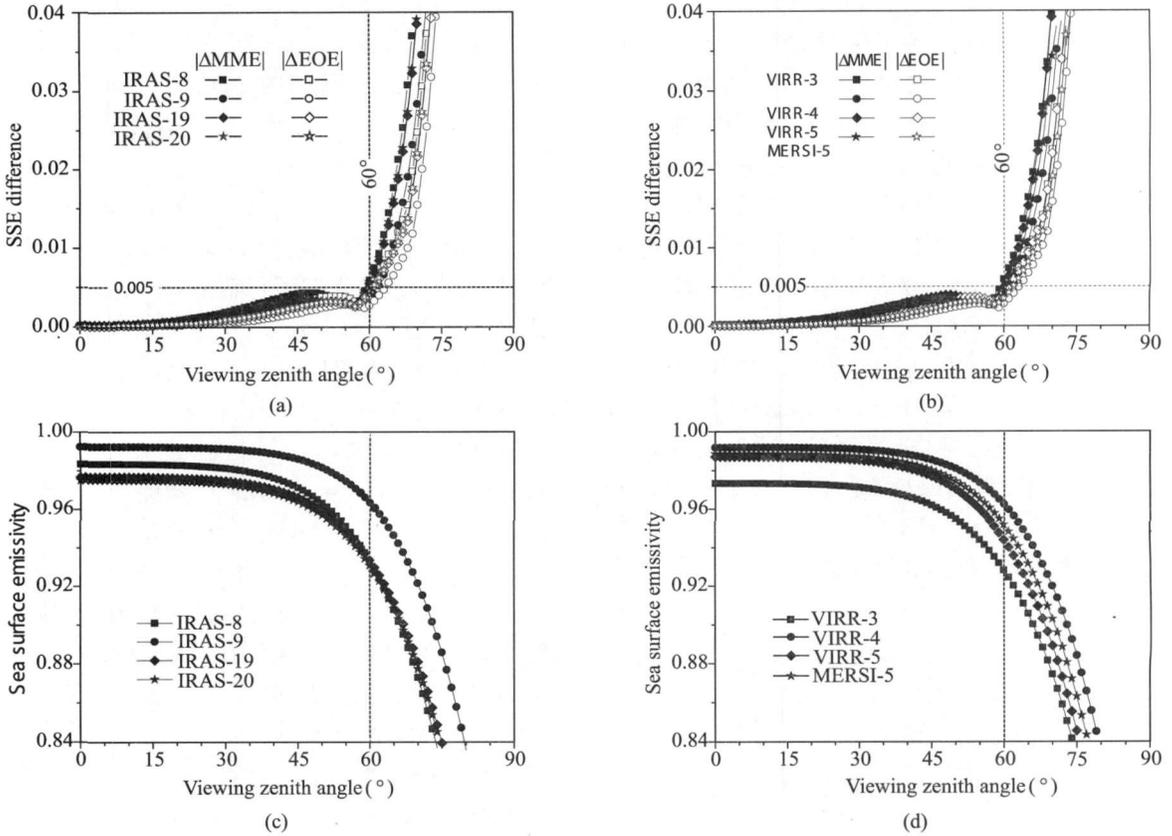


图6 各种风速条件下的 SSE 绝对差(a)和(b)和风速为 8m/s 条件下红外波段 SSE(c)和(d)随观测角度的变化情况

4 结束语

本文利用 Wu and Smith(1997)的 SSE 模型对搭载在 FY-3A 卫星上的 IRAS、MERSI 和 VIRR 传感器红外波段 SSE 进行模拟。模型所需的海水复折射率的实部采用 Hale and Query^[8](1973)的测量值,而虚部采用 Segelstein^[9](1981)的测量值,并用 Friedman^[10](1969)的测量数据进行调整。模拟结果表明,SSE 是观测角度、波长和海面风速的函数。当观测角度从 0°变化到 89°时,海表比辐射率从接近 1.0 减小到 0.3 以下。在相同条件下,SSE

随海面风速的增大而增大。本文结果与以前的研究结果基本一致。

模拟值与传感器波段响应函数进行卷积计算得到 IRAS、MERSI 和 VIRR 红外窗口波段 SSE。分析表明,在观测角度小于 60°时,波段 SSE 对风速不敏感,使用风速为 8m/s 的 SSE 所引起的总误差小于 0.5%。高斯函数能精确地描述波段 SSE 随观测角度变化的规律,其拟合误差小于等于 0.02%。用本文方法计算得到的 IRAS、MERSI 和 VIRR 红外窗口波段 SSE 能满足精确反演 SST 的要求。

参考文献

- [1] 周良明,郭佩芳,郭杰.ERS 散射计风速资料反演海面粗糙度[J].海洋湖沼通报,2006(2): 7- 11.
- [2] Anding,D.,Kauth,R.Estimation of sea surface temperature from space[J].Remote Sensing of Environment,1970,1(4):217- 220.
- [3] Cox,C.,Munk,W.Statistics of the sea surface derived from sun glitter[J].Journal of Marine Research,1954(13):198-227.
- [4] Friedman,D.Infrared characteristics of ocean water (1.5- 15 μm)[J].Applied Optics,1969(8):2073- 2078.
- [5] Jiang,G.-M.,Li,Z.-L.,Nerry,F.Land surface emissivity retrieval from combined mid-infrared and thermal infrared data of MSG-SEVIRI[J].Remote Sensing of Environment,2006(105):326- 340.
- [6] Hale,G.M.,Query,M.R.Optical constants of water in the 200- nm to 200- μm wavelength region[J].Applied Optics,1973(12):555- 563.

(下转第 57 页)

5 结束语

本文通过 6S 正演模拟,定量地研究了在相同条件下光谱响应差异引起的两遥感器表观反射比之间的差异。分析了一组两个遥感器对应相同地点观测时间足够相近的实际数据。主要结论如下:

(1) 模拟的结果表明:对于极区冰雪目标物的条件下,MODIS 与 MERSI 对应通道的光谱响应差异相对于 MODIS 的表观反射比满足二次函数关系。

(2) MERSI 的前 4 个通道测量值与其各自对应的 MODIS 测量值之间的相对差异在 0% ~ 0.8%, 0% ~ 2%, 0.5% ~ 2.5%, -1.8% ~ -0.8% 之间。

(3) 实际数据结果显示,在考虑了光谱响应差异之后,MERSI 的前 3 个通道与各自 MODIS 对应通道的表观反射比之间相对差异都在 3% 以内。同时需要进一步研究光谱响应差异对 MERSI 的 4 通道与其对应 MODIS 通道的影响。

(4) MERSI 的 1、2 通道在红外谱段的响应的影响很有限,正演结果显示在 -0.3% ~ 0.5% 以内,实际数据显示在 0.3% 左右,基本可以忽略其影响。

上述结论只在本论文限定的极区冰雪条件下成立,对于其他地区和其他地表观测物,MERSI 和 MODIS 光谱响应差异对测量表观反射比的影响还需要进一步的研究。

参考文献

- [1] 杨忠东,谷松岩,邱红,黄签,范天锡.中巴地球资源一号卫星 CCD 图像质量评价和交叉定标研究[J].遥感学报,2004,8(2):113-120.
- [2] 童进军.遥感卫星综合辐射定标方法研究[D].2004.
- [3] Cao Changyong, Heidinger Andrew K., Sullivan Jerry T. Using moderate resolution imaging spectrometer(MODIS) to calibrate advanced very high resolution radiometer reflectance channels[J]. Journal of Geophysical Research, 2002(107):X1- X9.
- [4] Teillet P. M., Fedosejevs G., Thome K. J., et al. Impacts of spectral band difference effects on radiometric cross-calibration between satellite sensors in the solar-reflective spectral domain[J]. Remote Sensing of Environment, 2007(110):393-409.
- [5] ZHANG Peng, YANG Jun, DONG Chao-hua, et al. General introduction on payloads, ground segment and data application of Fengyun 3A[J]. Frontiers of Earth Science in China, 2009(3):367-373.
- [6] LIU J. - J., QIAO Y. - L., LIU Y. - J., et al. A new method for cross-calibration of two satellite sensors[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004(25):5267-5281.
- [7] Montgomery Harry, QIU Shiyue, Barnes Bob, et al. Draft of the MODIS level 1B algorithm theoretical basic Document Version 2.0[R]. 1997.2
- [8] Vermote E., Didier Tanrè, Jean Luc Deuze, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997(35):675-686.
- [9] Cao C., Weinreb M., H. Xu. Predicting simultaneous nadir overpasses among polar-orbiting meteorological satellites for the intersatellite calibration of radiometers[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004(21):537-542.

(上接第 8 页)

- [7] Masuda, K. Takashima, T., Takayama, Y. Emissivity of pure and sea waters for the model sea surface in the infrared window regions[J]. Remote Sensing of Environment, 1988(24):313-329.
- [8] Nicl s, R., Valor, E., Caselles, V., Coll, C., Sanchez, J. M. In situ angular measurements of thermal infrared sea surface emissivity—validation of models[J]. Remote Sensing of Environment, 2005(94):83-93.
- [9] Saunders, P. M. Shadowing on the ocean and the existence of the horizon[J]. Journal of Geophysical Research, 1967(72):4643-4649.
- [10] Segelstein, D. J. The complex refractive index of water[D]. M. S. thesis (University of Missouri, Kansas City, Missouri). 1981.
- [11] Wu, X., Smith, W. L. Sensitivity of sea surface temperature retrieval to sea surface emissivity[J]. ACTA Meteorol. Sinica, 1996(10):376-384.
- [12] Wu, X., Smith, W. L. Emissivity of rough sea surface for 8-13 μm: modeling and verification[J]. Applied Optics, 1997, 36(12):2609-2619.