

中红外双通道夜间数据地表温度反演方法

赵恩宇^{1,2}, 钱永刚^{1*}, 王宁¹, 马灵玲¹, 唐伶俐¹

(1. 中国科学院光电研究院定量遥感信息技术重点实验室,北京 100094;

2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:地表温度反演是红外定量遥感的核心内容之一.与热红外(8~14 μm)数据相比,中红外(3~5 μm)波谱区大气透过率更高、对发射率的敏感性更低,在温度反演方面具有独特的优势.引入热红外地表温度反演思路,发展了仅利用夜间中红外双通道数据的地表温度反演算法,分析了宽通道组合(3~4 μm 和4~5 μm)和窄通道组合(3.929~3.989 μm 和4.020~4.080 μm)模式下的温度反演精度以及模型对噪声和发射率的敏感性.结果表明,宽、窄两种通道组合模型的温度反演精度分别为~0.5 K和~0.3 K;噪声等效温差和地表发射率误差对窄通道组合模型的影响更大.

关键词:中红外夜间数据;地表温度;地表发射率

中图分类号:P237 **文献标识码:**A

Retrieval of night-time land surface temperature from two mid-infrared channels data

ZHAO En-Yu^{1,2}, QIAN Yong-Gang^{1*}, WANG Ning¹, MA Ling-Ling¹, TANG Ling-Li¹

(1. Key laboratory of Quantitative Remote Sensing Information Technology,

Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Retrieval of land surface temperature (LST) is one of the key issues in mid- and thermal-infrared quantitative remote sensing. Compared with thermal-infrared (8~14 μm) channel, mid-infrared (3~5 μm) channel with the advantages, such as more transparent of atmospheric window and less sensitive to the surface emissivity, might be used to retrieve the LST. A two-channel LST retrieval algorithm, which only uses the night-time data of two mid-infrared channels and introduces the experience of thermal infrared LST retrieval method, has been proposed in this paper. The retrieval accuracies of two channel-combination models, i. e., narrow-channel model (3.929~3.989 μm and 4.020~4.080 μm) and wide-channel model (3~4 μm and 4~5 μm), were analyzed in detail. The results show that the LST retrieval accuracies of wide-channel and narrow-channel models are approximate ~0.5 K and ~0.3 K, respectively. However, compared with the wide-channel model, the noise equivalent temperature difference (NE Δ T) and the error of land surface emissivity (LSE) can produce a greater influence on the narrow-channel model.

Key words: mid-infrared night-time data, land surface temperature, land surface emissivity

PACS: 07.07.Df

引言

陆地表面温度(Land Surface Temperature, LST)在地-气相互作用过程中扮演着十分重要的角色,是

全球变化研究的关键参数,对水文、生态、环境和生物地球化学等研究有重要意义,在旱灾预报和作物缺水、农作物产量估算、数值天气预报、全球气候变化和全球碳平衡等方面发挥着重要的应用价值^[1].

收稿日期:2012-12-15,修回日期:2014-04-13

Received date: 2012-12-15, revised date: 2014-04-13

基金项目:国家自然科学基金(41101330 41371353);中国科学院光电研究院“雏鹰计划”

Foundation items: Supported by National Nature Science Foundation of China (41101330 41371353), and the Eyas Programme of Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences

作者简介 (Biography): 赵恩宇,男,辽宁大连人,硕士研究生,主要研究领域为中远红外遥感地表温度与比辐射率反演. E-mail: zhaoenyusdu@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author); E-mail: qianyg@aoe.ac.cn

红外遥感能够快速获取区域或全球尺度的地表信息,是获取大范围陆面温度唯一切实可行的方法.中红外(3 ~ 5 μm)或者热红外(8 ~ 14 μm)传感器都能够记录地表的热辐射信息,均具备温度反演的条件.目前国内外学者在热红外数据温度反演方面开展了大量的研究工作,发展了单通道算法^[2]、劈窗算法^[3]、多通道多角度算法^[4]、温度与比辐射率分离算法^[5]、基于 TISI 的地表温度与比辐射率反演方法^[6]、MODIS 昼/夜算法^[7]等.然而,由于传感器接收到的中红外信号中,地表的发射辐射、太阳的直射辐射与地表的反射辐射三者强耦合于一体,难以分离,因此对于仅利用中红外数据反演地表温度的方法却很少.

与热红外相比,中红外通道具有其自身的特点及优势:从大气影响的程度来看,尽管中红外区域仍受到诸如 H_2O 、 CO_2 、 CH_4 以及 O_3 等气体吸收的影响,但仍在部分区域内表现出很高的大气透过性,能够反映更多的地表辐射信息;从热辐射的原理来看,由于中红外波长较短,对于高温地表更为敏感,由普朗克函数可知,中红外通道能量变化随温度变化的敏感性比热红外更强; Mushkin 基于普朗克函数的理论推导发现,利用中红外反演温度时受到发射率的影响比热红外要低,0.02 的发射率误差对热红外通道(11 μm 附近)地表温度反演精度的影响约为 1.4 K,而对于中红外通道(4 μm 附近)的影响约为 0.5 K^[8].这些都是利用中红外遥感反演地表温度的优势.然而,仅利用中红外数据进行温度反演仍存在很大的挑战性,在白天时刻,中红外数据受到了太阳辐射和地表热辐射的共同影响,导致温度反演的不确定性大大增加;在夜间时刻,尽管不受太阳辐射的影响,然而地表自身的发射辐射、地表发射率和地表反射的大气下行辐射仍然耦合在一起,难以精确分离.本文希望利用中红外通道自身的优势,在仅利用中红外双通道夜间数据的情况下,引入适用于热红外通道的劈窗算法进行地表温度反演,并探讨该方法的适用性.

1 理论方法

1.1 中红外大气辐射传输理论

在局地热平衡及地表为朗伯体的假设下,中红外大气辐射传输方程为^[6]:

$$B_\lambda(T_i) = \tau_\lambda \varepsilon_\lambda B_\lambda(T_s) + \tau_\lambda (1 - \varepsilon_\lambda) (R_{atm,\lambda} \downarrow + R_{atm,\lambda}^s \downarrow) + \tau_\lambda \rho_{b\lambda} R_\lambda^s + R_{atm,\lambda} \uparrow + R_{atm,\lambda}^s \uparrow \quad (1)$$

其中: $B_\lambda(T_i)$ 为卫星传感器在每个波长 λ 上接收的

辐射(T_i 为卫星高度通道 i 的亮度温度); τ_λ 为从地面到传感器方向每个波长 λ 上的大气透过率; ε_λ 为每个波长 λ 上的地表发射率; T_s 为地表温度; $R_{atm,\lambda} \downarrow$ 和 $R_{atm,\lambda} \uparrow$ 分别为每个波长 λ 上大气下行和上行辐射; $R_{atm,\lambda}^s \downarrow$ 和 $R_{atm,\lambda}^s \uparrow$ 分别为每个波长 λ 上大气散射太阳辐射向下和向上的辐射; $\rho_{b\lambda}$ 是每个波长 λ 上的地表双向反射率; R_λ^s 为每个波长 λ 上的太阳直射辐射; B_λ 为普朗克函数.在不考虑太阳辐射影响(夜间时刻)的情况下,中红外辐射传输方程可写为:

$$B_\lambda(T_i) = \tau_\lambda \varepsilon_\lambda B_\lambda(T_s) + \tau_\lambda (1 - \varepsilon_\lambda) R_{atm,\lambda} \downarrow + R_{atm,\lambda}^s \uparrow \quad (2)$$

公式(2)与热红外的大气辐射传输方程在形式上是相同的.

为了获取通道平均辐射亮度,需要根据通道的设置情况(主要包括通道的响应函数、通道宽度),对公式(2)采用积分的方式进行获取.根据公式:

$$B_i(T_i) = \frac{\int_a^b \tau_\lambda \varepsilon_\lambda B_\lambda(T_s) f_i(\lambda) d\lambda}{\int_a^b f_i(\lambda) d\lambda} + \frac{\int_a^b (1 - \varepsilon_\lambda) \tau_\lambda R_{atm,\lambda} \downarrow f_i(\lambda) d\lambda}{\int_a^b f_i(\lambda) d\lambda} + \frac{\int_a^b R_{atm,\lambda} \uparrow f_i(\lambda) d\lambda}{\int_a^b f_i(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

其中 $f_i(\lambda)$ 表示通道响应函数, i 代表通道编号, a 和 b 代表通道起始波段位置,根据上式可以求出通道平均辐射亮度.

1.2 中红外双通道地表温度反演算法

适用于热红外通道温度反演的劈窗算法是利用 10 ~ 13 μm 谱段的大气窗口内,两个相邻通道(一般为 10.5 ~ 11.5 μm , 11.5 ~ 12.5 μm)对大气吸收作用的不同(尤其对大气中的水汽吸收作用的差异),通过两个通道测量值的各种组合来剔除大气的影响,进而反演地表温度.

本文旨在借鉴较为成熟的热红外劈窗算法,利用中红外相邻两通道对水汽吸收作用的差异性,实现夜间中红外双通道数据的地表温度反演.本文将 Wan 等提出的普适性劈窗算法^[9](Generalized Split-Window algorithm, GSW)扩展到中红外谱段,建立中红外双通道夜间数据的地表温度反演模型,公式如下:

$$T_s = a_0 + (a_1 + a_2 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + a_3 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2}) \frac{T_i + T_j}{2} + (a_4 + a_5 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + a_6 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2}) \frac{T_i - T_j}{2} \quad (4)$$

式中:假定 ε_i 和 ε_j 为相邻两通道 i, j 的地表发射率; $\varepsilon = (\varepsilon_i + \varepsilon_j)/2$ 为两个通道发射率的平均值; $\Delta\varepsilon = \varepsilon_i - \varepsilon_j$ 为两个通道发射率的差值; T_i 和 T_j 为两个相邻中红外通道的亮度温度; $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ 为系数. 这些系数可由实际观测数据拟合得到, 考虑到实际数据获取的难度, 也可利用模拟的传感器入瞳亮度温度数据及其对应的地表温度真值拟合得到^[9,10].

2 数据

本文提出了两种通道组合模式(宽-宽通道组合和窄-窄通道组合模式, 详见第 3 部分)下的地表温度反演模型, 为此需要模拟大量数据进行模型构建. 数据的获取主要利用 TIGR 大气廓线数据库, 基于大气辐射传输模型 MODTRAN 4 模拟多种大气状况下的大气参数, 再结合 ASTER 地物波谱库, 以及地表温度、观测角度等信息模拟中红外数据.

2.1 大气参数的获取

本文采用 TIGR 大气数据库进行大气参数的模拟. TIGR 大气数据库包含了从极地到赤道, 水汽含量从 $0.1 \sim 8 \text{ g/cm}^2$ 的全球范围内各种大气状况, 共计 2 311 条大气廓线(<http://ara.abct.lmd.polytechnique.fr/index.php?page=tigr>). 为了反演 LST, 本文首先对 TIGR 数据库中的大气廓线进行了云剔除^[10], 再从无云大气廓线中挑选出大气底层温度 (T_a) 在 $250 \sim 310 \text{ K}$ 之间、大气水汽含量 (Water Vapor Content, WVC) 在 $0.06 \sim 5.39 \text{ g/cm}^2$ 之间的共计 705 条大气廓线用于大气参数模拟.

考虑到表观辐亮度受观测天顶角 (View Zenith Angle, VZA) 的影响, 在模拟过程中设置了 6 种不同的 VZA ($0^\circ, 33.56^\circ, 44.42^\circ, 51.32^\circ, 56.25^\circ, 60^\circ$). 在 MODTRAN 4 中输入上述无云的大气廓线和六种观测天顶角, 就可以模拟出在这些大气状况下每个波长处的大气参数 ($\tau_\lambda, R_{atm,\lambda} \uparrow, R_{atm,\lambda} \downarrow$).

2.2 地表温度的设置及发射率的获取

为了获得更具有代表性的传感器入瞳亮度温度数据, 本文根据设置了一些合理的 LST. 考虑到研究对象为中红外夜间数据, 参考采用 MODIS 数据进行温度反演时的温度设置, 本文设置 LST 为 $T_a - 15\text{K}$ 到 $T_a + 5\text{K}$, 步长为 5 K . 另外, 本文利用 ASTER 光谱数据库中的地表方向半球反射率信息, 该数据库包括岩石、矿物质、土壤、人造材料、植被、冰雪等物质的光谱信息, 覆盖了从可见到热红外波长区域 ($0.4 \sim 15.4 \mu\text{m}$) 的光谱信息. 本文假设地表为朗伯

体, 根据基尔霍夫定律, 每个波长处的发射率可表示为: $\varepsilon(\lambda) = 1 - \rho(\lambda)$, 因此可以利用 ASTER 光谱数据库获得每个波长上的发射率.

2.3 数据模拟

对于一个给定的 LST, 结合大气参数 ($\tau_\lambda, R_{atm,\lambda} \uparrow, R_{atm,\lambda} \downarrow$) 和地表发射率, 根据方程 (2) 即可获得每个波长处的辐亮度, 对于宽通道数据, 本文采用建立通道辐亮度与通道亮温的查找表方式得到中红外宽通道亮温数据; 对于窄通道数据, 本文利用普朗克函数的逆函数直接计算得到中红外窄通道亮温数据.

本文讨论了 5 个地表温度范围, 70 种不同地物类型, 705 种无云 TIGR 大气廓线, 采用大气辐射传输模型 MODTRAN 4 模拟出 6 种观测角度下共计 1 480 500 个模拟数据, 为地表温度反演算法的建立提供了充足的数据源.

3 结果与分析

3.1 中红外双通道设置

为了分析所建立的双通道中红外数据地表温度反演算法的精度, 本文探讨了两种通道组合模式, 即宽通道组合和窄通道组合:

- 中红外宽通道组合

对于中红外宽通道组合, 本文对相邻的、通道宽度为 $1 \mu\text{m}$ 的两个通道温度反演精度进行分析, 通道范围分别为 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ 和 $4 \sim 5 \mu\text{m}$, 两个通道的响应函数设置为全响应的方波;

- 中红外窄通道组合

对于中红外窄通道组合, 本文将 MODIS 的 22 和 23 通道设置情况用于温度反演研究. 通道范围分别为 $3.929 \sim 3.989 \mu\text{m}$ 和 $4.020 \sim 4.080 \mu\text{m}$, 中心波长分别为 $3.97 \mu\text{m}$ 和 $4.06 \mu\text{m}$, 采用 MODIS 通道响应函数.

3.2 劈窗算法系数

为了确定方程 (4) 中的系数, 本文将 LST 和 WVC 分为几个区间, 以达到更高的温度反演精度. 其中将 WVC 分为 5 个小区间: $[0 \sim 1.5]$ 、 $[1 \sim 2.5]$ 、 $[2 \sim 3.5]$ 、 $[3 \sim 4.5]$ 、 $[4 \sim 5.5] \text{ g/cm}^2$, LST 分为 3 个小区间 $235 \text{ K} \leq \text{LST} \leq 265 \text{ K}$ 、 $260 \text{ K} \leq \text{LST} \leq 290 \text{ K}$ 、 $285 \text{ K} \leq \text{LST} \leq 315 \text{ K}$. 在每种 VZA ($0^\circ, 33.56^\circ, 44.42^\circ, 51.32^\circ, 56.25^\circ, 60^\circ$) 和 LST 下, 利用模拟数据拟合得到方程 (3) 的 7 个系数.

图 1 是在 6 种不同 VZA 下、在 WVC 为 $1 \sim 2.5 \text{ g/cm}^2$ 、LST 为 $285 \sim 315 \text{ K}$ 时, 宽通道和窄通道

的算法系数. 从图 1 中可以看出, 7 个系数与 $1/\cos(VZA)$ 呈一定的线性关系. 类似的情况在其他区间内也可以得到.

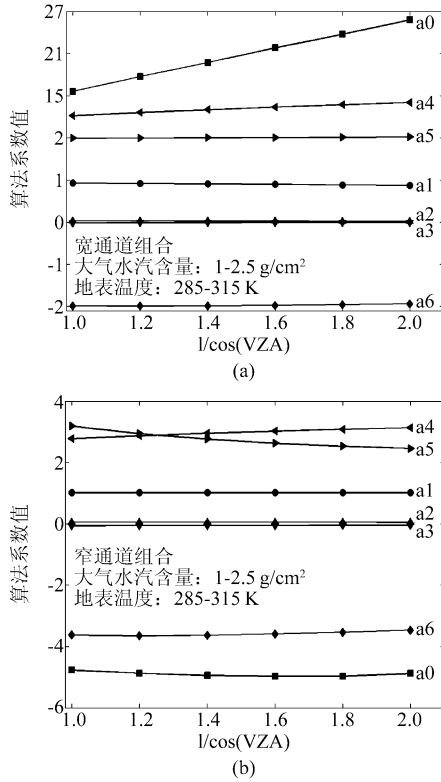


图 1 6 种 VZA 下的算法系数 (WVC: 1 ~ 2.5 g/cm², LST: 285 ~ 315 K) (a) 宽通道, (b) 窄通道
Fig.1 Coefficients of the algorithm for the sub-range with LST varying from 285 K to 315 K, and WVC from 1 g/cm² to 2.5 g/cm². (a) for wide-channel model and (b) for narrow-channel model

3.3 地表温度反演结果

本文采用中红外双通道夜间的模拟数据, 利用上述算法反演出夜间中红外数据的地表温度. 在实际情况下, 通常需要两步来完成对 LST 的反演. 首先, 结合大气水汽含量和地表发射率 (可以根据先验知识获取), 根据方程 (4), 粗略估计出地表温度初值; 然后根据地表温度估计初值, 以及大气水汽含量和地表发射率, 确定用于温度反演的算法系数, 最后反演出地表温度.

图 2 给出了在不同 VZA 与大气状况下, 地表温度真实值与反演值差值的 RMSE 变化情况. 从图 2 中可以看出: 无论是宽通道数据还是窄通道数据的地表温度反演, RMSE 随着 VZA 的增大而增大, 在所有小区间内的 RMSE 都小于 1 K; 而在不同的 VZA 情况下, 当 WVC 小于 4 g/cm² 的时候, 所有小

区间内的 RMSE 也都小于 1 K; RMSE 基本上随着 WVC 的增大而增大. 此外, 当 LST: 285 ~ 315 K、WVC: 0 ~ 1.5 g/cm²、VZA 为 0° 时, 窄通道地表温度反演的最小 RMSE 仅为 0.13 K; 宽通道地表温度反演的最小 RMSE 为 0.21 K.

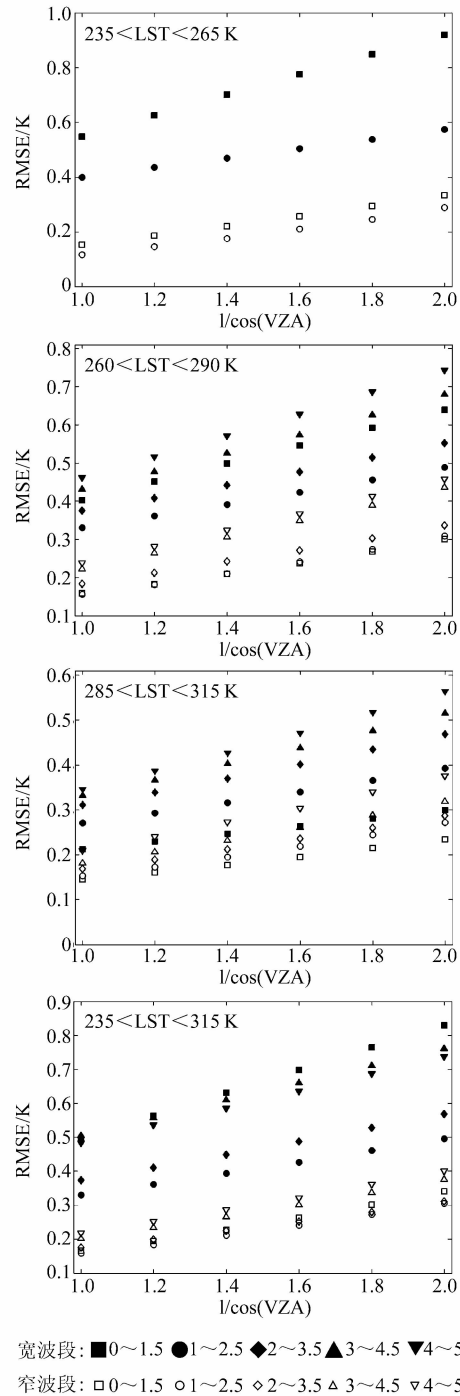


图 2 两种通道组合、不同 VZA 和 WVC 组合下的真实温度与反演值之间的差值 RMSE
Fig.2 RMSEs between the actual and estimated T_s as functions of the secant VZA for different sub-ranges of VZA and WVC

从上述分析可以得出如下结论:(1)劈窗算法能够有效应用于中红外双通道夜间数据的地表温度反演;(2)两种通道组合模型均能够得到较高的温度反演精度,其温度反演精度均在 1 K 以内;(3)从模型精度来看,窄通道组合模型要比宽通道组合模型的温度反演精度高,可能的原因是窄通道组合模型中的两个通道设置均处于大气窗口区,大气透过率较高;而宽通道组合模型中的两个通道设置涵盖范围较广,大气透过率相对较低,因而造成模型反演精度偏低。

4 敏感性分析

4.1 噪声等效温差的敏感性分析

噪声等效温差 (Noise Equivalent Difference Temperature, NE Δ T) 与地表温度反演精度有一定相关关系,本文通过在通道亮温 T_i 和 T_j 上分别加入 0.05 K, 0.1 K 和 0.2 K 的高斯随机误差的方式对 NE Δ T 对温度反演精度的敏感性进行了详细分析。

表 1 给出了在 VZA 为 0°、LST 为 285 ~ 315K 时,NE Δ T 对宽、窄通道组合模型的温度反演影响。其中 RN 为加入 NE Δ T 之后,不同水汽含量下窄通道组合地表温度真实值与反演值差值的 RMSE;RW 为加入 NE Δ T 之后,不同水汽含量下宽通道组合地表温度真实值与反演值差值的 RMSE。从表中可以看出,当 NE Δ T 增大时,温度反演误差增大,相同 NE Δ T 对窄通道组合地表温度反演精度的影响要大于宽通道组合。当 NE Δ T 为 0.05 K、0.1 K 和 0.2 K 时,NE Δ T 对宽通道组合地表温度反演精度的最大影响分别为 0.03 K、0.09 K 和 0.25 K;对窄通道组合的最大影响分别为 0.05 K、0.17 K 和 0.45 K。已有研究表明,0.1 K 和 0.2 K 的 NE Δ T 对热红外通道温度反演精度的影响分别为 0.01 K 和 0.07 K^[10]。可见,NE Δ T 对于中红外数据地表温度反演精度的影响要略大于热红外通道。

表 1 噪声等效温差 (NE Δ T) 对不同通道组合模式下地表温度反演的影响

Table 1 The effect of NE Δ T on the retrieval of LST in different models

WVC (g/cm ²)	NE Δ T=0 K		NE Δ T=0.05 K		NE Δ T=0.1 K		NE Δ T=0.2 K	
	RN(K)	RW(K)	RN(K)	RW(K)	RN(K)	RW(K)	RN(K)	RW(K)
0~1.5	0.14	0.21	0.19	0.24	0.28	0.30	0.51	0.46
1~2.5	0.15	0.27	0.20	0.29	0.29	0.34	0.53	0.50
2~3.5	0.17	0.31	0.22	0.33	0.31	0.38	0.57	0.55
3~4.5	0.18	0.33	0.23	0.35	0.35	0.41	0.62	0.58
4~5.5	0.21	0.35	0.26	0.37	0.38	0.42	0.66	0.60

4.2 地表发射率的敏感性分析

从地表温度反演公式(3)中可以看出,发射率对地表温度反演造成的影响主要由 $\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}$ 和 $\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2}$ 两项引起。因此,本文通过在 $\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}$ 和 $\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2}$ 上分别添加 1% 的高斯随机噪声的方法来分析地表发射率对地表温度反演的影响^[10]。

表 2 给出了在 VZA 为 0°、不同 WVC 和 LST 情况下,1% 的发射率误差对宽通道数据地表温度反演结果的影响。其中 RE 代表发射率加入 1% 的高斯随机噪声后,地表温度真实值与反演值之间差值的 RMSE;DR 表示没有发射率误差的地表温度反演值与加入 1% 发射率误差之后地表温度反演值之间差值的 RMSE。从表 2 中可以看出,在 4 组温度区间内,DR 值均在 0.16 ~ 0.22 K 之间,表明 1% 的发射率误差对宽通道数据的地表温度反演精度造成了 0.2 K 左右的相对误差。

表 2 1% 发射率误差对宽通道数据地表温度反演的影响 (VZA=0°)

Table 2 The effect of 1% error of emissivity on the retrieval of LST in wide-channel model

WVC (g/cm ²)	235~265(K)		260~290(K)		285~315(K)		235~315(K)	
	RE(K)	DR(K)	RE(K)	DR(K)	RE(K)	DR(K)	RE(K)	DR(K)
0~1.5	0.59	0.19	0.43	0.16	0.29	0.19	0.52	0.17
1~2.5	0.46	0.22	0.36	0.22	0.31	0.17	0.38	0.20
2~3.5	-	-	0.41	0.18	0.37	0.20	0.43	0.22
3~4.5	-	-	0.46	0.18	0.38	0.20	0.54	0.20
4~5.5	-	-	0.49	0.17	0.40	0.19	0.52	0.19

注:“-”表示数据量很小或者是没有数据

表 3 给出了在 VZA 为 0°时,在不同 WVC 和 LST 的情况下,1% 的发射率误差对窄通道数据地表温度反演结果的影响。从表 3 中可以看出,DR 的值在 0.16 ~ 0.22 K 之间,表明 1% 的发射率误差对窄通道数据的地表温度反演精度造成了 0.2 K 左右的相对误差。

表 3 1% 发射率误差对窄通道数据地表温度反演的影响 (VZA=0°)

Table 3 The effect of 1% error of emissivity on the retrieval of LST in narrow-channel model

WVC (g/cm ²)	235~265(K)		260~290(K)		285~315(K)		235~315(K)	
	RE(K)	DR(K)	RE(K)	DR(K)	RE(K)	DR(K)	RE(K)	DR(K)
0~1.5	0.26	0.22	0.22	0.16	0.23	0.19	0.27	0.22
1~2.5	0.22	0.19	0.24	0.19	0.26	0.20	0.27	0.20
2~3.5	-	-	0.26	0.19	0.27	0.22	0.26	0.21
3~4.5	-	-	0.26	0.19	0.28	0.17	0.27	0.18
4~5.5	-	-	0.29	0.21	0.30	0.19	0.30	0.21

注:“-”表示数据量很小或者是没有模拟数据

从上述数据中可以看出,发射率误差对于宽、窄通道地表温度反演精度的影响基本相同;另外,在不同湿度的大气状况下,发射率对温度反演的影响基本保持一致.热红外谱段温度反演的已有研究结果表明,在干燥大气状况下,1%的发射率误差对热红外通道地表温度反演精度的影响是1.4 K,而在湿润大气状况下,对精度的影响是0.5 K^[10].相对而言,1%发射率误差对中红外通道产生0.16~0.23 K的误差(见表2和表3),可见,发射率误差对中红外谱段地表温度反演精度的影响比对热红外谱段要小.

4.3 大气水汽含量的敏感性分析

为了分析大气水汽含量 WVC 的不确定性对地表温度反演精度的影响,本文将分析水汽区间的误选对地表温度反演精度的影响.在3.2节提到,本文将水汽分为五个子区间,并且每两个相邻的区间有0.5 g/cm²的重叠区域,当水汽含量落在两个子区间的重叠区域内时,利用两个水汽区间的算法系数反演温度时就会造成一定的误差.

限于篇幅原因,本文主要分析了干燥大气和湿润大气两种状况下的温度反演情况,即给出了在VZA为0°、LST为285~315 K、大气水汽含量两个重叠区([1~1.5]g/cm²,[4~4.5]g/cm²)时,水汽含量不确定性对宽通道模型温度反演精度的影响(详见图3).图3(a)和3(b)分别是在干燥大气情况下,将水汽区间[0~1.5]g/cm²和[1~2.5]g/cm²的算法系数用于水汽含量为[1~1.5]g/cm²的数据的地表温度反演结果,RMSE和偏差(BIAS)分别为0.21 K和0.01 K,0.24 K和-0.07 K.图3(c)和3(d)分别表示在湿润大气情况下,将水汽区间[3~4.5]g/cm²和[4~5.5]g/cm²的算法系数用于水汽含量为[4~4.5]g/cm²中的数据的地表温度反演结果,RMSE和BIAS分别为0.35 K和-0.02 K,0.34 K和0.07 K.

图4表示在VZA为0°、LST为285-315 K、大气水汽含量两个重叠区([1~1.5]g/cm²,[4~4.5]g/cm²)时,水汽含量不确定性对窄通道模型温度反演精度的影响.其中,图4(a)和4(b)分别表示在干燥大气情况下,将水汽区间[0~1.5]g/cm²和[1~2.5]g/cm²的算法系数用于水汽含量为[1~1.5]g/cm²的数据的地表温度反演结果,其RMSE和BIAS分别为0.136 K和0.004 K,0.146 K和-0.024 K.图4(c)和4(d)分别表示在湿润大气情况下,将水汽区间为[3~4.5]g/cm²和[4~5.5]g/cm²的算法

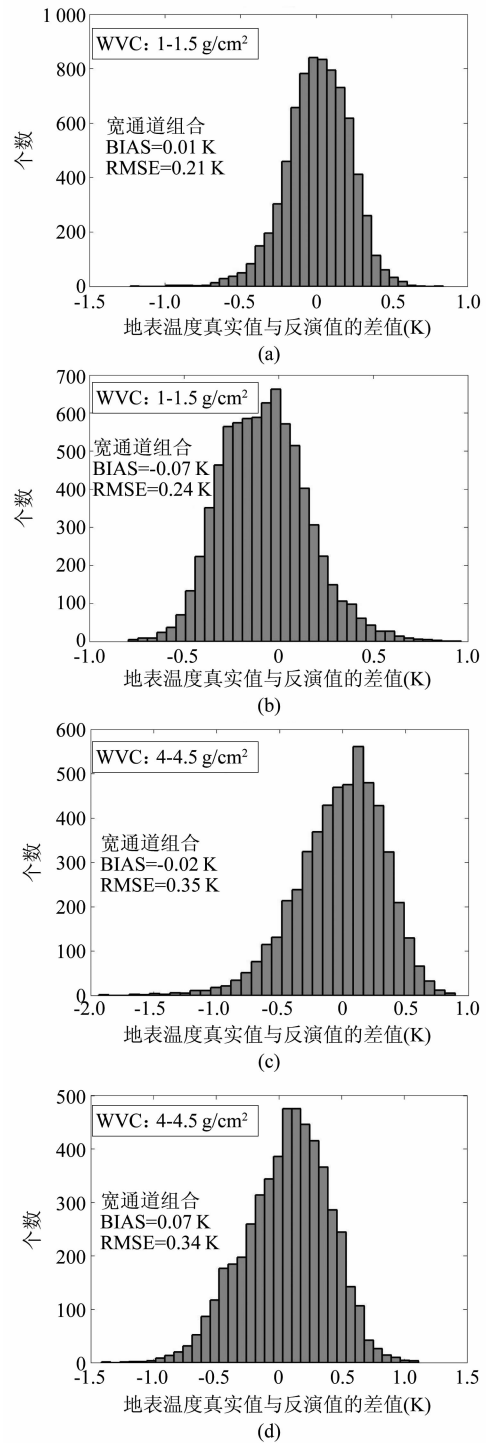


图3 水汽含量不确定性对宽通道模型温度反演精度的影响(VZA = 0°)(a)利用0~1.5 g/cm²区间的算法系数;(b)利用1~2.5 g/cm²区间的算法系数;(c)利用3~4.5 g/cm²区间的算法系数;(d)利用4~5.5 g/cm²区间的算法系数

Fig.3 The effect of the uncertainty of WVC on the retrieval of LST in wide-channel model (a) the result using the algorithm coefficient in WVC: 0~1.5 g/cm²; (b) the result using the algorithm coefficient in WVC: 1~2.5 g/cm²; (c) the result using the algorithm coefficient in WVC: 2~3.5 g/cm²; (d) the result using the algorithm coefficient in WVC: 3~4.5 g/cm²

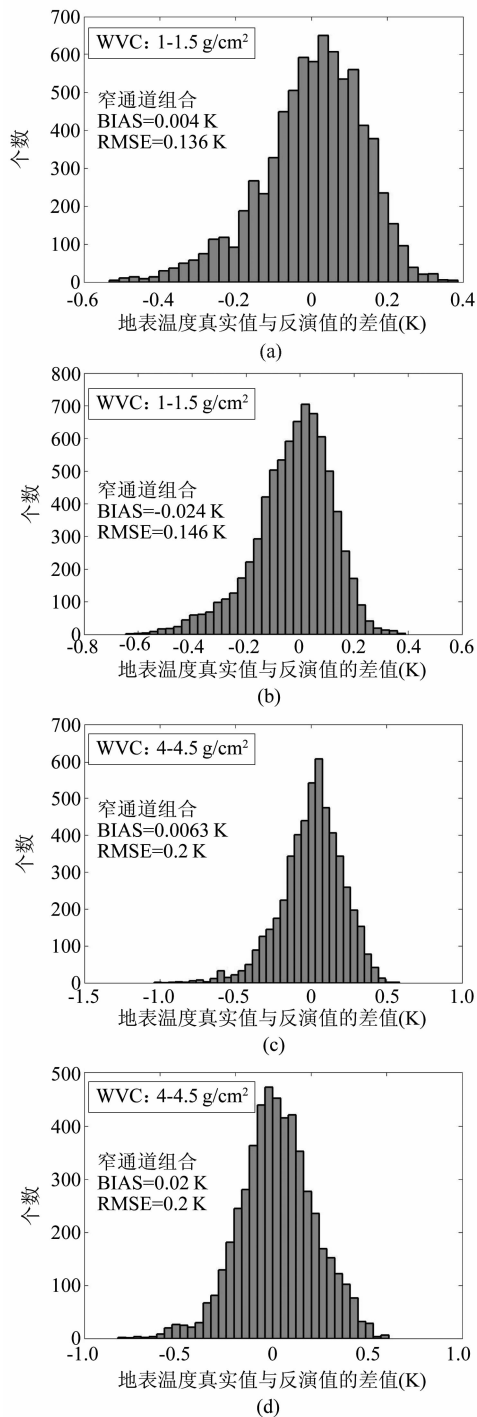


图4 水汽含量不确定性对窄通道模型温度反演精度的影响($VZA = 0^\circ$) (a) 利用 $0 \sim 1.5 \text{ g/cm}^2$ 区间的算法系数; (b) 利用 $1 \sim 2.5 \text{ g/cm}^2$ 区间的算法系数; (c) 利用 $3 \sim 4.5 \text{ g/cm}^2$ 区间的算法系数; (d) 利用 $4 \sim 5.5 \text{ g/cm}^2$ 区间的算法系数

Fig. 4 The effect of the uncertainty of WVC on the retrieval of LST in narrow-channel model (a) the result using the algorithm coefficient in WVC: $0 \sim 1.5 \text{ g/cm}^2$; (b) the result using the algorithm coefficient in WVC: $1 \sim 2.5 \text{ g/cm}^2$; (c) the result using the algorithm coefficient in WVC: $2 \sim 3.5 \text{ g/cm}^2$; (d) the result using the algorithm coefficient in WVC: $3 \sim 4.5 \text{ g/cm}^2$

系数用于水汽含量为 $[4 \sim 4.5] \text{ g/cm}^2$ 的数据的地表温度反演结果,其 RMSE 和 BIAS 分别为 0.2 K 和 0.006 3 K, 0.2 K 和 0.02 K.

5 结论

利用红外遥感的方式进行地表温度反演研究已经开展了许多年,国内外的学者们提出了很多有代表性的地表温度反演算法,但多是集中于热红外波段.中红外波段由于自身同时受到地表热辐射和太阳反射辐射影响的特点,目前独立用于地表温度反演的研究工作开展的还较少,但中红外波段有着对发射率误差不敏感等特点,决定了其在温度反演方面具有很大潜力.为了进一步利用中红外数据的优势,本文发展了仅利用中红外双通道数据的温度反演算法,并深入探讨了两种中红外双通道模式(宽通道组合,窄通道组合)下夜间数据进行地表温度反演的可行性.通过利用模拟数据进行的反演试验结果表明:

(1) 适用于热红外波段的普适性劈窗算法能够有效应用于中红外双通道夜间数据的地表温度反演;

(2) 在宽通道组合 ($3 \sim 4 \mu\text{m}$ 和 $4 \sim 5 \mu\text{m}$) 以及窄通道组合 ($3.929 \sim 3.989 \mu\text{m}$ 和 $4.020 \sim 4.080 \mu\text{m}$) 下,本文所发展的方法均能够得到很高的温度反演精度,其温度反演精度均在 1 K 以内,并且窄通道组合模式要比宽通道组合模式的温度反演精度高;

(3) 两种通道组合模式下,随着噪声等效温差的增大,地表温度反演误差逐渐变大;相同噪声等效温差的窄通道组合地表温度反演精度的影响要略大于宽通道组合;另外,噪声等效温差对于中红外数据地表温度反演精度的影响要大于热红外通道;

(4) 两种通道组合模式下,模型对地表发射率的敏感性基本相同;另外,发射率误差对于中红外数据地表温度反演精度的影响要小于热红外通道.

(5) 在对模型对大气水汽含量的敏感性分析可以看出,大气水汽区间的误选在干燥大气条件下,会出现 RMSE 约为 0.2 K 左右的误差,在湿润大气条件下,会产生 RMSE 约为 0.35 K 的误差.

本文的成果能够有效指导中红外遥感载荷在目标探测、地物识别等方面的应用,对于遥感载荷设计研制也具有一定的借鉴意义.然而本研究尚存在一些需要继续深入的工作,包括如何将算法应用于白天中红外数据的处理中,同时,本文所提出的算法还

有必要利用真实的数据进行进一步验证与改进.

References

- [1] Serafini Y V. Estimation of the evapotranspiration using surface and satellite data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1987, **8**(10):1547-1562.
- [2] Price J C. Estimating surface temperatures from satellite thermal infrared data-A simple formulation for the atmospheric effect [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1983, **13**(4):353-361.
- [3] Price J C. Land surface temperature measurements from split window channels of the NOAA 7 advance very high resolution radiometer [J]. *Journal of Geophysics Research*, 1984, **89**(D5):7231-7237.
- [4] Zhao-Liang Li. Methods of Land Surface Temperature retrieval [C]. Seminar of Advanced Technology and Application of Earth Observation (1) (李召良. 温度反演算法 [C], 先进对地观测技术与应用学术研讨会材料汇编(1)), 1999.
- [5] Gillespie A A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transaction on*, 1998, **36**(4):1113-1126.
- [6] Becker F, Li Z L. Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990a, **32**(1):17-33.
- [7] Wan Z, Li Z-L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transaction on*, 1997, **35**(4):986-996.
- [8] Amit Mushkin, Lee K Balick, Alan R Gillespie, Extending surface temperature and emissivity retrieval to the mid-infrared (3-5 μ m) using the Multispectral Thermal Imager(MTI) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **98**:141-151.
- [9] Wan Z, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transaction on*, 1996, **34**(4):892-905.
- [10] Tang B, Bi Y, Li Z-L, et al. Generalized Split-Window Algorithm for Estimate of Land Surface Temperature from Chinese Geostationary FengYun Meteorological Satellite (FY-2C) Data[J]. *Sensors*. 2008, **8**(2):933-951.