

文章编号: 1001-9014(2005)05-0381-05

分裂窗辐射量线性组合反演陆面温度的影响因子分析

周宁, 朱迅, 尹球

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 大气特性与地物发射率是影响陆温反演精度的主要因素, 不同的分裂窗表达式用于陆温反演存在不同的反演结果, 其中两通道辐射量线性组合形式的分裂窗算法受大气影响最小, 反演温度的误差也最小. 其反演温度的误差与大气透过率和大气向上辐射无关, 但与地物的发射率、大气向下辐射相关. 分裂窗表达式 $B(\lambda', T_s) = a \cdot I(\lambda_1) + b \cdot I(\lambda_2) + c$ 中的反演系数 a, b 与大气向上辐射无关, 但分别与通道 1、通道 2 的大气透过率成反比. 当定标点发射率不完全一致时, 二者还与大气向下辐射相关; 相反, 如果定标点发射率完全一致, 二者与大气向下辐射无关. 使用辐射量线性组合的分裂窗形式反演陆温时, 当大气向下辐射与地物的 Planck 辐射越相近, 误差越小.

关键词: 分裂窗; 温度反演; 热红外; 发射率

中图分类号: TP722.5 **文献标识码:** A

ANALYSIS ON INFLUENCING FACTORS OF LAND SURFACE TEMPERATURE RETRIEVED BY USING SPLIT WINDOW ALGORITHM WITH LINEAR COMBINATION OF TWO CHANNELS' RADIANCE

ZHOU Ning, ZHU Xun, YIN Qiu

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

Abstract: Characteristics of atmosphere and emissivities are the major influencing factors in land surface temperature retrieval. Different split window expressions can result in different retrievals of land surface temperature. Among them, the split window algorithm with linear combination of two channels' radiance has the least atmospheric influence. Retrieved temperature errors are correlated with emissivities and downwelling atmospheric radiance, not correlated with transmittance and upwelling atmospheric radiance. Retrieved coefficients (a and b) of split window method ($B(\lambda', T_s) = a \cdot I(\lambda_1) + b \cdot I(\lambda_2) + c$) have not relations with upwelling atmospheric radiance, but have inverse ratio with transmittance of two channels, respectively. When the land surfaces for calibration have different emissivities, the retrieved coefficients a and b have relations with downwelling atmospheric radiance, however, if the land surfaces for calibration have the same emissivities, the retrieved coefficients a and b will bear no relation to downwelling atmospheric radiance. When the downwelling atmospheric radiance is more approach to Planck radiance of land surface, the error of this method will be more trivial.

Key words: split window; temperature retrieval; thermal infrared; emissivity

引言

准确的地表温度对于气象预报等具有重要意义. 通过卫星或航空遥感器获取的热红外数据反演陆面温度是获得地表温度的重要手段. 在反演过程中, 大气与地物发射率的影响是不容忽视的.

一种常用的反演地物温度的方法是单通道法, 这需要进行大气校正, 然后将比发射率与地物温度区分开来. 然而要区分开地表发射率和温度是一件

非常复杂的事情. Schmugge 等 (1998) 使用 TES (Temperature Emissivity Separation) 方法将热红外多光谱数据进行分离, 分解出发射率和地表温度. 该方法最初由 Gillespie 于 1996 年提出. 由于使用该方法必须首先进行大气校正, 所以大气校正的精度对最后分离的地表温度也是一定影响的. Schmugge 等 (2002) 指出该方法的反演精度大约在 $\pm 5K$ 之间.

另一种常用的方法是将成功用于海面温度反演的分裂窗法加以扩展, 用于反演地物温度^[1]. 该分

收稿日期: 2004-12-01, 修回日期: 2005-06-05

Received date: 2004-12-01, revised date: 2005-06-05

基金项目: 上海市科技发展基金项目资助 (04dz05117, 035115006); 973 项目资助 (2001CB309401).

作者简介: 周宁 (1974-), 女, 重庆人, 中科院上海技物所助理研究员. 硕士, 主要从事环境遥感.

裂窗的表达式为:

$$T_s = A_0 + A_1 T_1 + A_2 T_2 \quad (1)$$

其中 T_1, T_2 分别为两相邻通道的亮温, T_s 为反演温度, A_0, A_1, A_2 分别为反演系数. Becker (1987 年)^[2] 指出式(1)中的系数依赖于大气吸收系数和地表发射率, 并且指出陆温误差的产生与发射率有关, 发射率的微小变化便可导致反演温度的较大误差. 所以, 该方法对于发射率均一的海面而言, 得到了广泛的应用. 但当将该方法用于陆面温度反演时, 由于陆地表面发射率变化较大, 这种方法的反演结果不仅误差很大, 而且很难预测. 于是 Becker 和 Li (1990)^[3] 以及 Kerr 等 (1992)^[4] 提出改进的分裂窗方法, 希望通过发射率校正生成局地分裂窗法, 在理论上可以减小由于发射率造成的影响, 但事实上, 发射率的获取有着很大难度^[5], 而且其精度也很难保证.

另外, Becker 和 Li^[3] 还指出陆温反演误差与发射率的关系在不同大气状况下会有所不同. 所以使用公式(1)所改进的分裂窗方法^[3-4] 其系数不仅需考虑发射率的影响, 还需加入大气影响因子的校正, 这使得计算较为复杂^[3].

周宁和尹球^[6] 比较了四种分裂窗表达式用于陆温反演所产生的误差, 指出使用遥感器两相邻通道辐射量线性组合的分裂窗算法在四种分裂窗算法中是受大气影响最小的一种, 其表达式为:

$$B(\lambda', T_s) = a \cdot I(\lambda_1) + b \cdot I(\lambda_2) + c \quad (2)$$

其中 $B(\lambda', T_s)$ 为 Planck 辐射, T_s 为反演温度, λ' 采用的是两通道中心波长的平均值, $\lambda' = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$, $I(\lambda_1), I(\lambda_2)$ 分别为热红外相邻两通道的辐射量, a, b, c 为反演系数.

本文分析了两相邻通道辐射量线性组合的分裂窗算法用于陆温反演时其反演系数 a, b, c 与大气因子、发射率之间的关系以及温度反演误差的具体来源, 所得结论对于改进陆温反演精度将有积极意义.

1 公式(2)三个反演系数的影响因子分析

陆温反演的影响因素主要为大气和发射率. 在本文中, 大气由大气透过率、大气向上辐射和大气向下辐射 3 个参数来描述.

大气热红外辐射传输方程为:

$$I_\lambda = \varepsilon_\lambda [B_\lambda(T_s) - R_{at\lambda\downarrow}] \cdot \tau_\lambda + R_{at\lambda\downarrow} \cdot \tau_\lambda + R_{at\lambda\uparrow} \quad (3)$$

其中 ε_λ 为地面物体在波长 λ 处的发射率, T_s 为地物的温度, $\tau_\lambda, R_{at\lambda\downarrow}, R_{at\lambda\uparrow}$ 分别为波长 λ 处的大气透

过率、大气向上辐射和大气向下辐射, $B_\lambda(T_s)$ 是该地物在波长 λ 处的 Planck 辐射. 对热红外通道而言, ε 则为通道发射率, $B(T_s)$ 为通道辐射量.

为了得出公式(2)中的 3 个参数, 需要知道地面定标点的温度与发射率. 假设现在已知 N 个地面点的温度 $T_{si}, i = 1, \dots, N$, 则这 N 个地面点的 Planck 辐射为 $Y_i = B(a', T_{si}), i = 1, \dots, N$; 各定标点两个通道的发射率为 $\varepsilon_{\lambda_j}, i = 1, \dots, N, j = 1, 2$. 由于各定标点的发射率是否完全一致对反演系数是有一定影响的, 所以下面按定标点发射率是否一致进行分述.

1.1 各定标点发射率很接近, 但不完全一致

由最小二乘法和热红外通道的传输方程(3), 经化简可得:

$$a = \frac{1}{\tau_{\lambda_1}} \cdot \frac{H_{\lambda_2} \cdot K - H_{\lambda_1} \cdot R_{\lambda_2}}{K^2 - R_{\lambda_1} \cdot R_{\lambda_2}} \quad (4a)$$

$$b = \frac{1}{\tau_{\lambda_2}} \cdot \frac{H_{\lambda_1} \cdot K - H_{\lambda_2} \cdot R_{\lambda_1}}{K^2 - R_{\lambda_1} \cdot R_{\lambda_2}} \quad (4b)$$

$$c = \bar{y} - a \cdot \left\{ \frac{1}{N} \cdot \tau_{\lambda_1} \sum_{i=1}^N F_{\lambda_1 i} + R_{at\lambda_1\downarrow} \cdot \tau_{\lambda_1} + R_{at\lambda_1\uparrow} \right\} - b \cdot \left\{ \frac{1}{N} \cdot \tau_{\lambda_2} \sum_{i=1}^N F_{\lambda_2 i} + R_{at\lambda_2\downarrow} \cdot \tau_{\lambda_2} + R_{at\lambda_2\uparrow} \right\} \quad (4c)$$

其中: $\bar{I}_{\lambda_j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{\lambda_j i}$, $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B(\lambda', T_{si})$, $K = \sum_{i=1}^N F_{\lambda_1 i} F_{\lambda_2 i} - N \cdot \bar{F}_{\lambda_1} \cdot \bar{F}_{\lambda_2}$, $R_{\lambda_j} = \sum_{i=1}^N F_{\lambda_j i}^2 - N \cdot \bar{F}_{\lambda_j}^2$, $H_{\lambda_j} = \sum_{i=1}^N F_{\lambda_j i} Y_i - N \cdot \bar{y} \cdot \bar{F}_{\lambda_j}$, $F_{\lambda_j i} = \varepsilon_{\lambda_j i} \cdot [B_{\lambda_j}(T_{si}) - R_{at\lambda_j\downarrow}]$, $i = 1, \dots, N, j = 1, 2$

由式(4)可以看出这时的反演系数 a 和 b 分别与通道 1、通道 2 的大气透过率成反比, 而与大气向上辐射无关, 但均受两通道大气向下辐射的影响; 反演系数 c 与两通道的大气向下辐射、大气向上辐射、大气透过率均相关; 各定标点的发射率、温度, 以及通道的选择对 3 个反演系数 a, b, c 均有影响.

在这里定标点的发射率是不一致的, 所谓的不一致只是有些微的不同. 如果定标点发射率的变化很大, 是不能用作反演温度的. 在实际运用时, 可选择某一类物体作为定标物(如水体), 它们的发射率可能会有一些不同, 但非常接近.

1.2 各定标点发射率一致

当定标点发射率一致时, 即 $\varepsilon_{\lambda_1 i} = \varepsilon_{\lambda_1 r}$, $\varepsilon_{\lambda_2 i} = \varepsilon_{\lambda_2 r}$, 公式(4)可进一步化简, 得到:

$$a = \frac{1}{\tau_{\lambda_1} \cdot \varepsilon_{\lambda_1 r}} \cdot \frac{Q_{(\lambda', \lambda_2)} \cdot Q_{(\lambda_1, \lambda_2)} - Q_{(\lambda', \lambda_1)} \cdot Q_{(\lambda_2, \lambda_2)}}{Q_{(\lambda_1, \lambda_2)}^2 - Q_{(\lambda_1, \lambda_1)} \cdot Q_{(\lambda_2, \lambda_2)}} \quad (5a)$$

$$b = \frac{1}{\tau_{\lambda_2} \cdot \varepsilon_{\lambda_2 r}} \cdot \frac{Q_{(\lambda', \lambda_1)} \cdot Q_{(\lambda_1, \lambda_2)} - Q_{(\lambda, \lambda_2)} \cdot Q_{(\lambda_1, \lambda_1)}}{Q_{(\lambda_1, \lambda_2)}^2 - Q_{(\lambda_1, \lambda_1)} \cdot Q_{(\lambda_2, \lambda_2)}}, \quad (5b)$$

$$c = \bar{y} - a \cdot \left\{ \frac{1}{N} \cdot \tau_{\lambda_1} \varepsilon_{\lambda_1 r} \sum_{i=1}^N B_{\lambda_1}(T_{si}) + \tau_{\lambda_1} (1 - \varepsilon_{\lambda_1 r}) R_{at\lambda_1 \downarrow} + R_{at\lambda_1 \uparrow} \right\} - b \cdot \left\{ \frac{1}{N} \cdot \tau_{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda_2 r} \sum_{i=1}^N B_{\lambda_2}(T_{si}) + \tau_{\lambda_2} (1 - \varepsilon_{\lambda_2 r}) R_{at\lambda_2 \downarrow} + R_{at\lambda_2 \uparrow} \right\}, \quad (5c)$$

其中 $Q_{(\alpha, \beta)} = \sum_{i=1}^N B_{\alpha}(T_{si}) B_{\beta}(T_{si}) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B_{\alpha}(T_{si}) \sum_{i=1}^N B_{\beta}(T_{si})$.

这时反演系数 a 分别与通道 1 的大气透过率、定标物通道 1 的发射率成反比,与大气向上辐射、大气向下辐射无关;反演系数 b 分别与通道 2 的大气透过率、定标物通道 2 的发射率成反比,与大气向上辐射、大气向下辐射无关;反演系数 c 与两通道的大气透过率、大气向上辐射、大气向下辐射均相关;各定标点的温度及通道的选择对 3 个反演系数 a 、 b 、 c 均存在一定影响。

由上可知,当定标点发射率完全一致时,系数 a 、 b 与大气向下辐射、大气向上辐射是完全无关的,他们只受定标点与大气透过率的影响。

2 公式(2)反演结果影响因子分析

当定标点的发射率不一致时,将式(4)的 a 、 b 、 c 代入公式(2),其中通道辐射量由大气传输方程(3)代入,

$$\text{设 } k_1 = \frac{H_{\lambda_2} \cdot K - H_{\lambda_1} \cdot R_{\lambda_2}}{K^2 - R_{\lambda_1} \cdot R_{\lambda_2}}, k_2 = \frac{H_{\lambda_1} \cdot K - H_{\lambda_2} \cdot R_{\lambda_1}}{K^2 - R_{\lambda_1} \cdot R_{\lambda_2}}, \text{ 化$$

简可得:

$$B(\lambda', T_{s物}^o) = k_1 \varepsilon_{\lambda_1 物} [B_{\lambda_1}(T_s) - R_{at\lambda_1 \downarrow}] + k_2 \varepsilon_{\lambda_2 物} [B_{\lambda_2}(T_s) - R_{at\lambda_2 \downarrow}] + \bar{y} - \frac{1}{N} \cdot k_1 \cdot \sum_{i=1}^N F_{\lambda_1 i} - \frac{1}{N} \cdot k_2 \cdot \sum_{i=1}^N F_{\lambda_2 i}, \quad (6)$$

反演结果 $T_{s物}^o$ 与分裂窗两通道大气向下辐射、物体自身发射率、定标点的参数(发射率和温度)、通道选择相关,与大气透过率、大气向上辐射无关。

当定标点发射率一致时,将式(5)中的 a 、 b 、 c 代入分裂窗表达式(2),同时设 $g_1 =$

$$\frac{Q_{(\lambda', \lambda_2)} \cdot Q_{(\lambda_1, \lambda_2)} - Q_{(\lambda', \lambda_1)} \cdot Q_{(\lambda_2, \lambda_2)}}{Q_{(\lambda_1, \lambda_2)}^2 - Q_{(\lambda_1, \lambda_1)} \cdot Q_{(\lambda_2, \lambda_2)}}, \quad g_2 =$$

$$\frac{Q_{(\lambda', \lambda_1)} \cdot Q_{(\lambda_1, \lambda_2)} - Q_{(\lambda', \lambda_2)} \cdot Q_{(\lambda_1, \lambda_1)}}{Q_{(\lambda_1, \lambda_2)}^2 - Q_{(\lambda_1, \lambda_1)} \cdot Q_{(\lambda_2, \lambda_2)}} \text{ 化简可得:}$$

$$B(\lambda', T_{s物}^o) = \frac{g_1 \varepsilon_{\lambda_1 物}}{\varepsilon_{\lambda_1}} [B_{\lambda_1}(T_s) - R_{at\lambda_1 \downarrow}] + \frac{g_2 \varepsilon_{\lambda_2 物}}{\varepsilon_{\lambda_2}}$$

$$[B_{\lambda_2}(T_s) - R_{at\lambda_2 \downarrow}] + \bar{y} - \frac{1}{N} \cdot g_1 \sum_{i=1}^N B_{\lambda_1}(T_{si}) + g_1 R_{at\lambda_1 \downarrow} - \frac{1}{N} \cdot g_2 \sum_{i=1}^N B_{\lambda_2}(T_{si}) + g_2 R_{at\lambda_2 \downarrow}. \quad (7)$$

同样由式(7)可得出结论:两通道的大气向下辐射、地物自身两通道发射率、定标点的参数(发射率与温度)、通道选择对反演结果会有影响,而大气透过率、大气向上辐射对反演结果没有影响。

由以上分析可知,定标点的发射率是否一致,最后反演结果都不会受到大气向上辐射和大气透过率的影响。

以实用型模块化成像光谱仪系统(OMIS)的两热红外通道为例进行计算,两通道的中心波长分别为 $8.08 \mu\text{m}$ 与 $8.728 \mu\text{m}$. 选取 8 类、共 61 种发射率已知的地物,包括:水体、土壤、植被、砖、人行道、石材、瓷砖、沙纸. 这些物体的发射率来源于 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) UCSB (University of California, Santa Barbara) Emissivity Library. 误差计算以中纬度冬季大气为基准,其中两通道大气透过率变化范围在 $-0.4 \sim 0.1$ 之间,变化步长为 0.01; 大气向上辐射变化范围在 $-2 \sim 4 \text{ Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ 之间,变化步长为 $0.1 \text{ Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$; 大气向下辐射变化范围在 $-2 \sim 4 \text{ Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ 之间,变化间隔为 $0.1 \text{ Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$. 以水体作为定标物,计算出所有物体在分别改变大气透过率、大气向上辐射、大气向下辐射情况下,温度反演误差均方根变化分别见图 1、图 2、图 3.

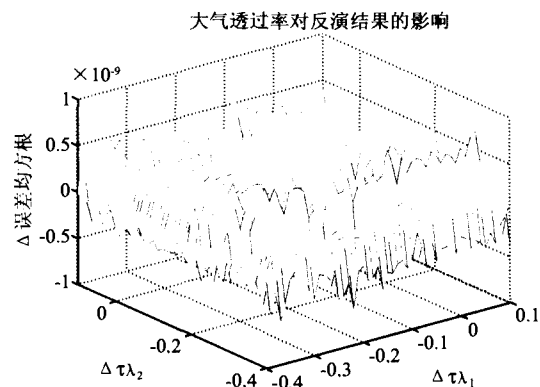


图 1 x 轴为通道 1 的大气透过率变化, y 轴为通道 2 的大气透过率变化, z 轴为 61 种地物反演误差均方根相对于中纬度冬季大气状况下反演误差均方根的变化

Fig. 1 x and y axes denote changes of transmittance of channel one and two, respectively. Z axis is the changes of RMSE of 61 species against RMSE under MidLatitude winter atmosphere model versus different transmittance

大气向上辐射对反演结果的影响

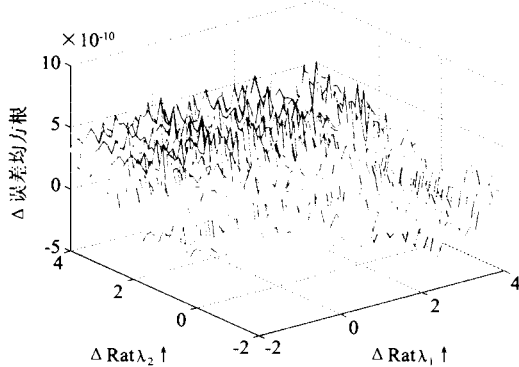


图2 x轴为通道1的大气向上辐射变化,y轴为通道2的大气向上辐射变化,z轴为61种地物反演误差均方根相对于中纬度冬季大气状况下反演误差均方根的变化

Fig. 2 x and y axes denote changes of upwelling radiance of channel one and two, respectively. Z axis is the changes of RMSE of 61 species against RMSE under Mid-Latitude winter atmosphere model versus different upwelling radiance

大气向下辐射对反演结果的影响

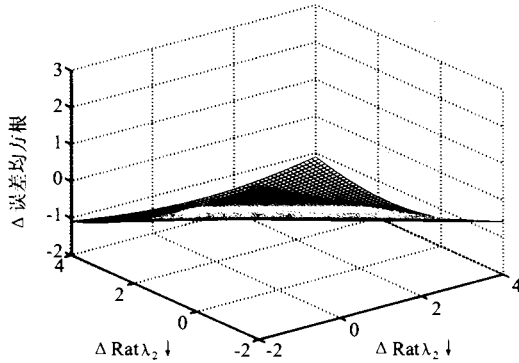


图3 x轴为通道1的大气向下辐射变化,y轴为通道2的大气向下辐射变化,z轴为61种地物反演误差均方根相对于中纬度冬季大气状况下反演误差均方根的变化

Fig. 3 x and y axes denote changes of downwelling radiance of channel one and two, respectively. Z axis is the changes of RMSE of 61 species against RMSE under Mid-Latitude winter atmosphere model versus different downwelling radiance

随着大气透过率的改变,61种物体反演温度误差均方根的变化维持在 $\pm 1 \times 10^{-9}$ K之间,完全可以忽略;随着大气向上辐射的改变,物体反演温度误差均方根的变化维持在 $-0.5 \sim 1 \times 10^{-9}$ K之间,也是可以忽略的;随着大气向下辐射的改变,物体反演温度误差均方根的变化维持在 $-1.5 \sim 2.5$ K之间,这个量级不能忽略,说明大气向下辐射对反演结果会有影响.结论与公式论证相吻合.

3 大气向下辐射与地物 Planck 辐射越相近,该地物的反演温度误差就越小

如果地物发射率为定标点发射率时,即 $\varepsilon_{\lambda_1 \text{物}} = \varepsilon_{\lambda_1 r}, \varepsilon_{\lambda_2 \text{物}} = \varepsilon_{\lambda_2 r}$,式(7)可化简得:

$$B(\lambda', T_s^{\circ}) = g_1 B_{\lambda_1}(T_s) + g_2 B_{\lambda_2}(T_s) + \bar{y} - \frac{1}{N} \cdot g_1 \sum_{i=1}^N B_{\lambda_1}(T_{si}) - \frac{1}{N} \cdot g_2 \sum_{i=1}^N B_{\lambda_2}(T_{si}) \quad (8)$$

反演结果 T_s° 完全与大气参数、自身发射率无关,只与地物自身的温度相关.也就是说,当地物发射率完全等同于定标点发射率时,通过分裂窗法可以完全消除大气和地物发射率的影响.这时的反演温度 T_s° 可以认为是物体的真实温度.于是我们可以算出反演误差(式(7)减去式(8)):

$$\begin{aligned} \text{err} &= B(\lambda', T_{\text{物}}^{\circ}) - B(\lambda', T_s^{\circ}) \\ &= g_1 \left(\frac{\varepsilon_{\lambda_1 \text{物}}}{\varepsilon_{\lambda_1 r}} - 1 \right) [B_{\lambda_1}(T_s) - R_{\text{at}\lambda_1 \downarrow}] \\ &\quad + g_2 \left(\frac{\varepsilon_{\lambda_2 \text{物}}}{\varepsilon_{\lambda_2 r}} - 1 \right) [B_{\lambda_2}(T_s) - R_{\text{at}\lambda_2 \downarrow}] \quad (9) \end{aligned}$$

由上式不难看出大气向下辐射与地物 Planck 辐射越相近,该地物的反演温度误差就越小.根据不同温度黑体的光谱辐射率曲线图,不同温度物体的辐射率随着波长的增大,它们之间的差异不断减小.所以,如果分裂窗两个通道的中心波长越往长波长靠, $[B_{\lambda_1}(T_s) - R_{\text{at}\lambda_1 \downarrow}]$ 和 $[B_{\lambda_2}(T_s) - R_{\text{at}\lambda_2 \downarrow}]$ 的值就会越小,温度反演的误差就越小,理论上可以尽量避免通过求取地物发射率来校正其反演温度误差的麻烦,因为发射率是很难精确获得的.但事实上由于大气窗的限制,波长不可能取得太大,只能在大气窗范围内尽量取得大一些,但不足以使 $[B_{\lambda_1}(T_s) - R_{\text{at}\lambda_1 \downarrow}]$ 和 $[B_{\lambda_2}(T_s) - R_{\text{at}\lambda_2 \downarrow}]$ 的值很小,使得 $\text{err} \approx 0$ 而避免发射率的影响.再加上不同波长的发射率也在变化,当选择长波长时有可能地物的发射率与定标点发射率差异也增大,所以通过波长选取只是有可能减小反演温度的误差,具体选用哪些通道还要根据实际情况而定.

4 结论

普遍用于海温反演的亮温线性组合形式的分裂窗法受大气影响较大,对于发射率均一的海水而言,这种影响得到很好的控制,而当这种方法用到陆地上,由于地物发射率的不均一,大气的影晌便突出了. Sobrino^[7](1993)指出用这种分裂窗法反演海温

精度很难达到 0.3K, 主要是由大气影响造成的, 并分析了大气总水蒸气含量对温度反演的影响. 本文提出辐射量线性组合形式的分裂窗法可以有效地消除大气透过率和大气向上辐射的影响, 这大大减小了大气对反演温度的影响. 周宁和尹球^[6]模拟这种方法反演陆面温度的精度在 3K 以内.

本文还指出辐射量线性组合形式的分裂窗反演系数 a 、 b 分别与两通道的大气透过率成反比关系, 当定标点的发射率有些微差别时, 二者还与大气向下辐射相关; 而当定标点发射率完全一致时, 二者与大气向下辐射是完全无关的.

REFERENCES

- [1] Sobrino J A, Coll C, Caselles V. Atmospheric correction for land surface temperature using NOAA II AVHRR[J]. *Remote sensing of environment*, 1991, **38**:19—34.
- [2] Becker F. The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1987, **8**:1509—1522.
- [3] Becker F, Li Z L. Toward a local split window method over land surfaces[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, **3**:369—393.
- [4] Kerr Y H, Lagouarde J P, Imberon J. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm[J]. *Remote sensing of environment*, 1992, **41**:197—209.
- [5] XIAO Qing, LIU Qin-Huo, LI Xiao-Wen, et al. A field measurement method of spectral emissivity and research on the feature of soil thermal infrared emissivity [J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (肖青, 柳钦火, 李小文, 等. 热红外发射率光谱的野外测量方法与土壤热红外发射率特性研究. *红外与毫米波学报*), 2003, **22**(5):373—378.
- [6] Zhou Ning, Yin qiu. A method for retrieving land surface temperature based on the split window algorithm with linear combination of two channels' radiance[J]. *Chinese Journal of Radio Science*(周宁, 尹球, 一种热红外分裂窗辐射量线性组合的陆地温度遥感反演方法, *电波科学学报*), 2004, **19**(4):464—468.
- [7] Sobrino J A, Li Z L, Stoll M P. Impact of the atmospheric transmittance and total water vapor content in the algorithms for estimating satellite sea surface temperature [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, 1993, **31**(5):946—952.
- [1] Sobrino J A, Coll C, Caselles V. Atmospheric correction for land surface temperature using NOAA II AVHRR[J]. *Remote sensing of environment*, 1991, **38**:19—34.
- [2] Becker F. The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1987, **8**:1509—1522.
- [3] Becker F, Li Z L. Toward a local split window method over land surfaces[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, **3**:369—393.
- [4] Kerr Y H, Lagouarde J P, Imberon J. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm[J]. *Remote sensing of environment*, 1992, **41**:197—209.
- [5] XIAO Qing, LIU Qin-Huo, LI Xiao-Wen, et al. A field measurement method of spectral emissivity and research on the feature of soil thermal infrared emissivity [J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (肖青, 柳钦火, 李小文, 等. 热红外发射率光谱的野外测量方法与土壤热红外发射率特性研究. *红外与毫米波学报*), 2003, **22**(5):373—378.
- [6] Zhou Ning, Yin qiu. A method for retrieving land surface temperature based on the split window algorithm with linear combination of two channels' radiance[J]. *Chinese Journal of Radio Science*(周宁, 尹球, 一种热红外分裂窗辐射量线性组合的陆地温度遥感反演方法, *电波科学学报*), 2004, **19**(4):464—468.
- [7] Sobrino J A, Li Z L, Stoll M P. Impact of the atmospheric transmittance and total water vapor content in the algorithms for estimating satellite sea surface temperature [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, 1993, **31**(5):946—952.
- (上接第 380 页)
- [2] Zhang L, Xie H J. Electro-optic effect in a semi-parabolic quantum well with an applied electric field [J]. *Mod. Phys Lett. B*, 2003, **17**(9): 347—354.
- [3] Atanasov R, Bassani F. Second-order nonlinear optical susceptibility of asymmetric quantum well [J]. *Phys. Rev. B*, 1994, **50**(11): 7809—7819.
- [4] Ahn D, Chuang S L. Calculation of linear and nonlinear intersubband optical absorptions in a quantum well model with an applied electric field [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1987, **QE-23**(12): 2196—2204.
- [5] Kan Y, Nagai H, Yamanishi M, et al. Field effects on the refractive index and absorption coefficient in AlGaAs quantum well structures and their feasibility for electrooptic device applications [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1987, **QE-23**(12): 2167—2180.
- [6] Chang Y C, Schulman J N, Efron U. Electro-optic effect in semiconductor super-lattices [J]. *J. Appl. Phys.* 1987, **62**: 4533—4537.
- [7] Chuang S L, Ahn D. Optical transitions in a parabolic quantum well with an applied electric field- analytical solutions [J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **65**: 2822—2826.
- [8] Kuhn K J, Lyengar G U, Yee S. Free carrier induced changes in the absorption and refractive index for intersubband optical transitions in Al_xGa_{1-x}/GaAs/Al_xGa_{1-x} quantum wells [J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, **70**: 5010—5017.
- [9] ZANG Jian-Ping, LIU Zi-Bo, ZOU Wen-Yuan, et al. Analysis of Nonlinear optical absorption in thick optically Klon-linear media [J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (臧维平, 刘智波, 周文远, 等. 厚光学非线性介质非线性吸收的理论分析. *红外与毫米波学报*) 2004, **23**(3):229—232.
- [10] Eerdunchaolu, Temperatere aependence of the sdf trapping energy of strong-cowpling pelaron in a quantum well [J]. (额尔敦朝鲁, 量子阱小强耦合极化子自陷能的温度依赖性. *红外与毫米波学报*) *J. Infrared Millim. Waves.* 2005, **24**(2):89—92.