

地表不均匀性对陆面温度反演的影响和 用实际卫星资料反演陆面温度的试验*

汪宏七 赵高祥 王立志

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

摘要 分析了非均匀地表对陆面温度卫星遥感反演的影响, 通过模拟试验检验了在反演算法中把非均匀地表作为等效均匀地表来处理的可行性, 并用一组实际的 GMS-5/VISSR 红外窗区通道测量资料进行了陆面温度反演试验.

关键词 非均匀地表, 陆面温度, 卫星遥感, 反演.

EFFECT OF LAND SURFACE NON-UNIFORMITY ON LAND SURFACE TEMPERATURE RETRIEVAL AND RETRIEVAL TESTS OF LAND SURFACE TEMPERATURE BY REAL SATELLITE MEASUREMENTS*

WANG Hong-Qi ZHAO Gao-Xiang WANG Li-Zhi

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract The effect of land surface non-uniformity on land surface temperature retrieval was investigated. A non-uniform land surface in retrieval could be considered and treated as an uniform land surface with an equivalent temperature. Furthermore, a set of real GMS-5/VISSR infrared channel data was used to determine land surface temperature with the retrieval algorithm.

Key words non-uniform land surface, land surface temperature, satellite remote sensing, retrieval.

引言

利用红外窗区通道进行洋面温度测量的卫星遥感早已取得成功. 对于均匀地表, 在地表比辐射率已知的情况下, 也可用红外窗区通道来确定地面温度^[1-5]. 但在通常的情况下, 陆地表面的地表类型复杂多变, 地表的不均匀性不仅有地区差别, 也有时间变化, 不仅有从卫星遥感仪器的视场到视场的变化, 在同一视场中一般也是不均匀的, 而且, 地表比辐射率还会随地表类型不同而表现出不同的复杂的光谱变化. 因此, 地表比辐射率通常不能预先知道, 尤其在卫星视场是由地表比辐射率不同的各类型地表组成时, 更难预先给定一个恰当的地表比辐射率, 这使得陆面情况下温度反演十分困难. 利用在 2 个不同时刻的 2 个通道测量的反演算法, 可以在不需要预先知道通道地表比辐射率的情况下, 同时确定地面

温度和比辐射率^[6], 对大气的影响也可以通过地面温度反演的模拟试验进行了考察分析^[7,8], 结果表明, 在均匀地表的情况下, 用这种反演算法通常可得到关于二次测量时合理的地面温度的解. 但在实际情况下, 地表一般是不均匀的, 因此, 这种反演方法是否能达到实用, 还必须对非均匀地表的影响进行分析考虑, 并利用实际卫星资料进行陆面温度反演来检验.

1 遥感方程和反演算法

1.1 均匀地表

在均匀地表的情况下, 第 i 通道, 第 j 次测量的大气顶射出辐射强度 I_{ij} 可表示为

$$I_{ij} = \varepsilon_{ij} B_i(T_{ij}) \tau_{sij} + (1 - \varepsilon_{ij}) \tau_{sij} I_{dij} + I_{u_{ij}} \quad (1)$$

其中, ε 是地面比辐射率, B 为地面 planck 辐射强度, T_s 为地面温度, τ_s 为从地面到卫星的大气路径

* 国家自然科学基金(批准号 49875006)和国家重点基础研究发展规划(批准号 G1999043400)资助项目
稿件收到日期 2002 - 02 - 25, 修改稿收到日期 2002 - 06 - 03

* The project supported by the National Science Foundation of China (No. 49875006) and The National Key Basic Research Development Program (No. G1999043400)
Received 2002 - 02 - 25, revised 2002 - 06 - 03

透过率, I_d 为到达地面的大气有效向下辐射强度, I_u 为大气路径向上辐射强度. 地面向上辐射强度 I_{gy} 表示为

$$I_{gy} = \varepsilon_{ij} B_i(T_{yj}) + (1 - \varepsilon_{ij}) I_{dij}. \quad (2)$$

这里, I_{gy} 可以由测量 I_{ij} 以及计算量 I_{uij} 和 τ_{sij} 算出. 在二次测量通道的比辐射率不变时, 式(2)可表示为

$$I_{gy} = \varepsilon_i B_i(T_{yj}) + (1 - \varepsilon_i) I_{dij}, \quad (i=1, 2; j=1, 2). \quad (3)$$

在式(3)中, 未知数为 2 个地面温度和 2 个通道的比辐射率, 通常可以有确定的解.

1.2 非均匀地表

在非均匀地表的情况下, 卫星遥感仪器的视场中的地表可以看作由比例不同的若干种均匀地表组成, 仪器接收的辐射强度由相应视场中不同地表的若干个分量合成, 这时, 第 i 通道, 第 j 次测量的大气顶射出辐射强度 I_{ij} 可表示为

$$I_{ij} = \sum_{n=1}^N A_n I_{ijn} \\ = \sum_{n=1}^N A_n (\varepsilon_{ijn} B_i(T_{ijn}) \tau_{sij} + (1 - \varepsilon_{ijn}) \tau_{sij} I_{dij} + I_{uj}). \quad (4)$$

其中, A_n 为视场中第 n 种均匀地表的比, N 为视场中不同地表的总数, 其他符号的意义与前面相同, 下标 n 表示相应于第 n 类地表的量, I_d 、 I_u 和 τ_s 都是只与大气有关的量. 式(4)可改写成

$$I_{ij} = \varepsilon_{ij} B_i(T_{sji}) \tau_{sij} + (1 - \varepsilon_{ij}) \tau_{sij} I_{dij} + I_{uj}. \quad (5)$$

其中

$$\varepsilon_{ij} = \sum_{n=1}^N A_n \varepsilon_{ijn}, \quad (6)$$

$$B_i(T_{sji}) = \sum_{n=1}^N A_n \varepsilon_{ijn} B_i(T_{ijn}) / \sum_{n=1}^N A_n \varepsilon_{ijn}. \quad (7)$$

式(5)意味着由若干类均匀地表组成的非均匀地表视场, 可以作为具有等效地表比辐射率 ε_{ij} 和等效地面温度 T_{sji} 的均匀地表视场来处理. 这时, 地表对大气顶向上辐射强度 I_{ij} 的贡献与把各类地表分开考虑时它们总的贡献相同, 大气对辐射强度 I_{ij} 的贡献在这二种情况下也相同. 只要式(5)中的等效地面温度 T_{sji} 与通道无关, 则式(5)与式(1)在形式上完全相同, 用于均匀地表时二通道反演算法就可用来得到非均匀地表情况下的等效均匀地表的温度 T_{sji} 和比辐射率 ε_{ij} . 但是, 由式(7)可以看到, 等效地面温度 T_{sji} 是与各类地表的比、各类地表的通道比辐射率和各类地表的温度有关的量. 均匀地表等效通道比辐射率可看作不同类型地表的通道比辐射率按各类地表的比加权平均的量, 在一般情况下, 视场中不同类型地表的温度按各类地表

的比例加权平均的量并不是能使式(5)成立的均匀地表的等效地面温度, 只有在不同类型地表温度相同时, 式(5)中的 T_{sji} 才与通道无关. 通常, T_{sji} 将因通道的不同而有所差别. 这时, 式(5)所表示的方程组中, 未知数的数目将多于方程的数目, 不可能同时确定. 但在下面的地面温度反演试验中, 仍把等效均匀地表的温度作为与通道无关的量, 用二通道算法进行反演.

1.3 表现通道比辐射率

由式(5), 定义通道的表现比辐射率 $\varepsilon_{ij}^{\alpha}$ 为

$$\varepsilon_{ij}^{\alpha} = \left(\frac{I_{ij} - I_{uj}}{\tau_{sij}} - I_{dij} \right) / B_i(T_{sji}) - I_{dij}. \quad (8)$$

显然, 在大气辐射计算无误差时, 通道的表现比辐射率 $\varepsilon_{ij}^{\alpha}$ 与由式(6)计算的通道均匀地表等效比辐射率 ε_{ij} 相同, 但在辐射传输计算时利用的大气温度、湿度和气溶胶有误差时, $\varepsilon_{ij}^{\alpha}$ 和 ε_{ij} 一般不再相等. 在非均匀地表时, 用二通道算法反演等效均匀地表地面温度的精度主要取决于二次测量时各个通道的表现比辐射率 $\varepsilon_{ij}^{\alpha}$ 变化的情况和各个通道的等效均匀地表地面温度之间的差别大小.

2 模拟试验

在非均匀地表情况下进行地面温度反演的模拟试验时, 对二通道算法用了中心在 930.58 cm^{-1} 和 848.18 cm^{-1} 的 2 个通道. 由于在实际的卫星遥感测量中, 二次测量的视场可能不完全重叠, 可造成视场中不同类型地表的比在二次测量时有所不同. 这样, 即使在二次测量时各类地表不同通道的比辐射率变化的比例相同或通道的比辐射率保持不变, 其等效均匀地表下的通道比辐射率一般将不再满足这些条件. 因此, 在模拟试验中, 需要对二次测量时视场中各类地表的比变化的情况加以考察.

在地面温度反演试验中把组成非均匀视场的均匀地表类型的总数 N 取为 3. 在二次测量时组成视场的 3 类地表的比保持不变的情况下, 根据视场中各类地表地面温度不同, 各类地表通道的比辐射率及其在二次测量时的变化不同, 以及大气影响不同, 把总共 1728 组测量划分成 4 类, 没有大气订正误差的第一和第二类各包括 144 组测量, 有不同大气订正误差的第三和第四类各包括 720 组测量, 用 2 通道算法进行反演试验. 表 1 总结了这些反演试验的情况. 表 1 中, $\Delta\alpha_{21}$ 表示第二次测量时视场中各类地表的比相对于第一次时的均方根相对变化, $\Delta\varepsilon_{21}$ 为第二测量时视场中各类地表实际的通道

比辐射率相对于第一次时的均方根变化, $\Delta\epsilon_{\epsilon,21}$ 为实际的各类地表的比辐射率的变化共同造成的第二次测量时等效通道比辐射率相对于第一次时的均方根变化; $\text{rmse}I_u$ 、 $\text{rmse}I_d$ 和 $\text{rmse}\tau_{\epsilon}$ 分别为在大气订正中应用的大气温度、湿度和气溶胶有误差造成的大气向上、大气向下辐射强度和大气路径透过率计算的均方根相对误差; $(\Delta\epsilon_{\epsilon,21})_{\text{total}}$ 为由大气影响、视场中各类地表的比辐射率的变化共同造成的第二次测量时的等效均匀地表表观通道比辐射率相对于第一次时的均方根差别; $\text{rmse}\epsilon_{\epsilon}$ 为反演得到的通道的均匀地表等效比辐射率的均方根误差; $\text{rmse}T_{mc}$ 表示与通道有关的等效地面温度相对于它们的平均值的均方根偏差, 它表明各个通道的均匀地表等效地面温度之间差别的大小, $\text{rmse}T_{av}$ 为各个通道的均匀地表等效地面温度与由各类地表的比辐射率加权平均计算得到的地面温度之间的均方根偏差, $\text{rmse}T_r$ 为反演得到的等效地面温度相对于实际的均匀地表等效地面温度的均方根误差, T_{smax} 为反演得到的等效地面温度的极大偏差。

表1的第一类结果表明, 在非均匀地表的情况下, 即使二次测量时各类地表实际的比辐射率保持不变, 各个通道的等效比辐射率也保持不变, 但由于不同通道的等效地面温度有差别, 即使在没有大气订正误差时也不可能精确反演得到通道的等效比辐射率和等效地面温度。第三类情况与第一类不同的是有大气温度、湿度和气溶胶造成的辐射量计算误差, 这使得二次测量时通道的表观比辐射率有差别, 从而反演得到的等效地面温度的误差有所增大。第二类情况与第一类相比, 第四类情况与第三类相比, 不同之处是二次测量时各类地表的比辐射率有些差别。

表2给出在二次测量时, 非均匀地表视场中3类地表比例发生变化情况下的反演结果。与表1类似, 把总共1728组测量划分成4类, 用二通道算法

进行反演试验。表2的第一类情况与表1的第一类情况的区别仅在于二次测量时视场中各类地表的比辐射率有约17%的均方根差别, 从而造成通道的等效比辐射率在二次测量时有变化(均方根偏差为0.0029), 但等效地面温度的反演误差在这二种情况下并无明显差别, 第二类与第一类情况相比, 温度反演误差的差别不大, 但还是可以看到地表比辐射率的变化使反演误差有所增加。第三和第四类与第一和第二类情况比较, 大气影响造成了二次测量时通道的表观比辐射率之间的差别显著增大, 地面温度的反演误差也有较为明显的增加。

由表1和表2的各类情况可见, 影响反演精度的各种因素的作用并非是叠加的, 与只有某种因素影响时相比, 同时有各种因素的影响不一定使反演误差有很大的增加。比较表2与表1中相应的各类情况, 还可以看到, 在二次测量时相当显著的视场中各类地表比例的变化并未对反演精度造成明显的影响。

3 由 GMS-5/VISSR 红外窗区通道资料反演陆面温度

为了考察提出的反演算法用于实际卫星资料的情况, 利用1997年3月11~20日, 在澳大利亚 Amburla 试验场(23.39S, 133.12E), GMS-5/VISSR (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer) 11 μm 和 12 μm 2个红外窗区通道在每天7点、8点、8点半、9点和10点(地方时)的5次辐射测量资料^[1], 进行了陆面温度的反演试验, 离 Amburla 约100 km 的 Alice 在8点的探空资料(温度和湿度)被用于在反演中进行辐射传输计算和大气订正。与卫星辐射测量同时的实地测量的地面温度被用来与反演结果比较, 估计反演误差。作为比较, 同一组卫星资料还用2种分裂窗算法和1种基于遥感方程的参考算法来确定陆面温度。这3种算法分别介绍如下

表1 在二次测量时视场中各类地表的比辐射率相同的情况下用二通道算法反演地面温度的试验

Table 1 Using two channel algorithm, retrieval tests of land surface temperature in cases of same land surface type ratios in FOV at two measurement times

| 类 | 地 面 状 况 | | | 大 气 影 响 | | | $(\Delta\epsilon_{\epsilon,21})_{\text{total}}$ | 反 演 结 果 | | | | |
|---|----------------------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|
| | $\Delta\alpha_{21}$ (%) | $\Delta\epsilon_{21}$ | $\Delta\epsilon_{\epsilon,21}$ | $\text{rmse}I_u$ (%) | $\text{rmse}I_d$ (%) | $\text{rmse}\tau_{\epsilon}$ (%) | | $\text{rmse}\epsilon_{\epsilon}$ | $\text{rmse}T_r$ (K) | T_{smax} (K) | $\text{rmse}T_{mc}$ (K) | $\text{rmse}T_{av}$ (K) |
| 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0000 | 0.0135 | 0.64 | 1.96 | 0.03 | 0.37 |
| 2 | 0.0 | 0.0109 | 0.0069 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0069 | 0.0138 | 0.63 | 2.14 | 0.03 | 0.37 |
| 3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 14.61 | 14.12 | 5.31 | 0.0214 | 0.0143 | 0.76 | 2.14 | 0.03 | 0.37 |
| 4 | 0.0 | 0.0109 | 0.0069 | 14.61 | 14.12 | 5.31 | 0.0221 | 0.0147 | 0.76 | 2.33 | 0.03 | 0.37 |

表 2 在二次测量时视场中各类地表的比例不同的情况下的地面温度反演试验

Table 2 Retrieval tests of land surface temperature in cases of different land surface type rations and in FOV at two measurement times

| 类 | 地面状况 | | | 大气影响 | | | $(\Delta \varepsilon_{r,21})_{total}$ | 反演结果 | | | | |
|---|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------|------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| | $\Delta \alpha_{21}$ (%) | $\Delta \varepsilon_{21}$ | $\Delta \varepsilon_{r,21}$ | $rmseI_u$ (%) | $rmseI_d$ (%) | $rmse\tau_s$ (%) | | $rmse\varepsilon_r$ | $rmseT_s$ (K) | $T_{s,max}$ (K) | $rmseT_{me}$ (K) | $rmseT_{av}$ (K) |
| 1 | 17.12 | 0.0 | 0.0029 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0029 | 0.0135 | 0.64 | 2.02 | 0.03 | 0.37 |
| 2 | 17.12 | 0.0109 | 0.0076 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0076 | 0.0138 | 0.66 | 2.31 | 0.03 | 0.37 |
| 3 | 17.12 | 0.0 | 0.0029 | 14.61 | 14.12 | 5.31 | 0.0220 | 0.0143 | 0.76 | 2.14 | 0.03 | 0.37 |
| 4 | 17.12 | 0.0109 | 0.0076 | 14.61 | 14.12 | 5.31 | 0.0227 | 0.0147 | 0.76 | 2.35 | 0.03 | 0.37 |

(1) 参考算法:

$$B_1(T_s) = [(I_1 - I_{d1})/\tau_{s1} - I_{d1}]/\varepsilon_1 + I_{d1} \quad (9)$$

在大气状况和地表比辐射率都知道的情况下,可由一个通道的遥感方程直接确定地面温度 T_s . 但这些条件在实际应用时很难同时满足,因此,这一算法只是在试验情况下作为比较. 在地表比辐射率已知,大气状况未知的情况下,则可用分裂窗方法确定地面温度^[1].

(2) 分裂窗算法 I:

$$T_s = [T_{b1} + 3.16(T_{b1} - T_{b2}) - 253.16(1 - \delta)]/\delta \quad (10)$$

(3) 分裂窗算法 II:

$$T_s = T_{b1} + [1.34 + 0.507(T_{b1} - T_{b2})](T_{b1} - T_{b2}) + 0.56 + \alpha(1 - \varepsilon) - \beta\Delta\varepsilon \quad (11)$$

在式(10)和(11)中, T_{b1} 和 T_{b2} 分别为二个通道的亮温,并有:

$$\delta = \varepsilon_1 + 2.36\Delta\varepsilon, \Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2, \varepsilon = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)/2,$$

$$\alpha = 2.517(b_1 - b_2), \beta = 2.517b_2 + 0.5\alpha,$$

$$b_1 = (0.198 + 0.167W)T_{b1} - (62.3W - 10),$$

$$b_2 = (0.234 + 0.206W)T_{b2} - (78.9W - 5).$$

ε_1 和 ε_2 为二个通道的地面比辐射率, W 为整层大气水汽量.

在反演过程中, 11 μm 通道比辐射率 ε_1 用测量值 0.96, 12 μm 通道比辐射率 ε_2 为 0.95. 由于没有大气气溶胶的资料, 故在辐射传输计算中用了不同的气溶模式. 当在辐射传输计算中的用地面能见度分别为 15 km、10 km 和 5 km 的乡村气溶胶模式^[9]时, 用现在的二通道反演算法和上述 3 种算法对 3 \times 3 个视场的 GMS-5/VISSR 红外窗区通道资料反演得到的地面温度与同时实际的地面温度比较的结果列出在表 3 中, 表中 VIS 为地面能见度. 分裂窗算法 I 和 II 为统计反演方法, 考虑大气水汽订正的方法 II 一般比方法 I 的反演误差小. 由参考算法得到的地面温度误差最小, 其误差主要来自辐射计算模

表 3 用不同算法对 VISSR 红外窗区通道 3 \times 3 个视场的辐射测量反演得到的地面温度偏差

Table 3 The errors of retrieved land surface temperatures with different algorithms for 3 \times 3 pixels with GMS-5/VISSR infrared channel data

| 反演算法 | VIS(km) | 均方根偏差(K) | 极大偏差(K) |
|----------|---------|----------|---------|
| 分裂窗算法 I | — | 2.78 | 5.69 |
| 分裂窗算法 II | — | 2.50 | 5.14 |
| 参考算法 | 5 | 2.12 | -4.22 |
| 参考算法 | 10 | 2.19 | -4.67 |
| 参考算法 | 15 | 2.25 | -4.99 |
| 二通道算法 | 5 | 2.23 | -4.89 |
| 二通道算法 | 10 | 2.46 | -5.78 |
| 二通道算法 | 15 | 2.56 | -6.07 |

式的误差和大气温度、湿度和气溶胶的误差, 以及给定的通道比辐射率的误差. 二通道算法与分裂窗方法的反演误差相当或较好, 但由于用不同气溶胶模式时反演误差有明显不同, 可见大气订正误差对反演精度的影响是很大的.

表 4 为用参考算法对 3 \times 3 视场的 VISSR 的 11 μm 通道的测量, 用无线电探空得到的大气温度和湿度廓线以及地面能见度为 5 km 的乡村气溶胶模式, 在通道比辐射率为 0.96 时得到的澳大利亚 Amburla 试验场 1997 年 3 月 11 ~ 20 日, 每天 5 次的地面温度与实际测量的地面温度的偏差(均方根偏差为 2.12 K). 表 5 为对 3 \times 3 视场的 11 和 12 μm 通道的辐射测量, 用二通道算法得到的地面温度与实际测量的地面温度的偏差(均方根偏差为 2.23 K). 表 6 对 VISSR 的 11 μm 通道, 由辐射传输计算得到的辐射强度相对于测量的辐射强度的偏差. 表 4 中, 10 天总共 50 个反演的地面温度中, 反演误差大于 3 K 的有 10 次. 对照表 6 可见, 它们对应于计算和测量辐射强度有较大偏差的情况. 由于在现在的二通

道反演算法中,地面温度和通道的地表比辐射率都是未知数,反演误差一般要比参考算法大,对照表5与表6可以看到,大于3 K的反演误差基本上也是相应于计算和测量辐射强度有较大偏差的情况,这种偏差与大气订正误差密切相关.另外,由于试验地区并非完全是均匀地表,实测的地面温度是由12到15个取样点测量温度的平均来代表的,在夜间的标准偏差虽然小于1 K,在白天却可超过5 K,这就意味着用以检验反演的地面温度精度的实测地面温度本身就有误差的,从而,实测与反演的陆面温度之间的偏差并非完全就是反演误差.在用分裂窗反演算法I反演地面温度时,地面温度偏差与大气参数的误差无关,但与用于进行检验的实测地面温度的误差密切相关,反演结果表明,在相应于表6中4次辐射的负偏差大于3%的情况,反演的温度都有很大的正偏差;而在相应于8次辐射的正偏差大于3%的情况,6次反演温度有很大的负偏差.这类偏差除了与反演算法固有的误差有关外,可能与用于检验的实测地面温度与实际的均匀地表等效地面温度不一致有很大关系.这也表明在表4和表5中较大的温度反演的偏差,可能与实测地面温度与实际的均匀地表等效地面温度不一致有很大关系.与表3的结果相比,由对3月11日到20日夜间7点到10点每天5次的辐射测量进行反演得到的陆面温度的偏差可以看到,虽然在大气订正时仍用上午8时的大

气温度和湿度的探空资料,时间差别在12h左右,会有较大的误差,但参考算法和现在的二通道算法反演的陆面温度偏差并未增大,反而有所减小.考虑到用以检验反演结果的实测陆面温度是由十几个点的测量值平均得到的,在白天其均方差可超过5 K,而夜间可达1 K以下,因此,夜间的实测地面温度应更接近于实际的均匀地表等效地面温度,可能造成夜间反演的陆面温度偏差并未增大.这也说明白天反演结果的偏差有一部分就可能来自实测陆面温度本身的误差.

4 结论

通过将非均匀地表作为等效均匀地表处理,用二通道算法进行地面温度反演的模拟试验可以看到,在二次测量时,无论非均匀地表视场中各类地表的比辐射率不变或有所变化,实际通道的地表比辐射率不变或有变化,反演得到的均匀地表等效地面温度均有相当好的精度.在进行地面温度的卫星遥感反演时,视场中地表的不均匀性、二次测量时通道的地表比辐射率变化和在卫星视场不完全重叠造成的各类地表比例的变化,以及在辐射传输计算中利用的大气温度、湿度和气溶胶廓线的误差,都会对反演精度产生影响,但这些因素的作用并不是简单地叠加的,与只有某种因素影响时相比,同时有几种因素的影响并不一定使反演误差有很大的增加.模拟

表4 对3×3视场用参考算法得到的地面温度的偏差(K)

Table 4 Deviations(K) of retrieved land surface temperatures with reference algorithm for 3×3 pixels

| (地方时) | 时 | 间 | 日 期 | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| | 3月11日 | 12日 | 13日 | 14日 | 15日 | 16日 | 17日 | 18日 | 19日 | 20日 |
| 7:00 | 0.77 | 1.43 | 0.78 | -4.22 | -2.42 | 1.36 | 1.19 | 4.15 | 2.57 | -4.07 |
| 8:00 | -0.64 | -0.54 | -2.35 | -2.24 | -1.53 | 1.15 | 0.97 | 1.28 | -0.04 | -3.22 |
| 8:30 | -0.29 | -1.13 | -3.17 | -0.97 | -1.09 | 1.37 | 0.85 | 1.32 | -2.46 | -2.55 |
| 9:00 | 0.46 | -1.42 | -3.07 | 0.34 | 0.01 | 1.57 | 1.39 | 2.03 | -3.52 | -1.80 |
| 10:00 | 2.68 | -2.24 | -0.80 | 1.93 | 2.09 | 3.45 | 0.55 | 3.30 | -3.68 | -1.44 |

表5 对3×3视场用二通道反演算法得到的地面温度的偏差(K)

Table 5 Deviations(K) of retrieved land surface temperatures with two channel algorithm for 3×3 pixels

| (地方时) | 时 | 间 | 日 期 | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|
| | 3月11日 | 12日 | 13日 | 14日 | 15日 | 16日 | 17日 | 18日 | 19日 | 20日 |
| 7:00 | 0.66 | 1.04 | 0.39 | -4.36 | -2.24 | 1.52 | 1.02 | 4.04 | 2.47 | -3.88 |
| 8:00 | 0.74 | -0.91 | -2.64 | -2.37 | -1.68 | 1.00 | 0.55 | 0.90 | -0.98 | -3.57 |
| 8:30 | -0.91 | -1.75 | -3.70 | -1.37 | -1.26 | 0.95 | 0.20 | 0.41 | -3.32 | -3.13 |
| 9:00 | -0.13 | -2.28 | -3.83 | -0.31 | -0.43 | 0.91 | 0.26 | 0.61 | -4.33 | -2.61 |
| 10:00 | -1.40 | -3.55 | -1.95 | 0.82 | 0.93 | 2.33 | -0.97 | 1.75 | -4.89 | -2.64 |

表 6 对 VISSR 的 11 μm 通道计算的辐射强度相对于测量辐射强度之偏差Table 6 Deviations of calculated radiances relative to measured ones for VISSR 11 μm channel

| (地方时) | 时 | | 间 | | 日 期 | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | 3月11日 | 12日 | 13日 | 14日 | 15日 | 16日 | 17日 | 18日 | 19日 | 20日 |
| 7:00 | -0.010 | -0.018 | -0.009 | 0.055 | 0.032 | -0.018 | -0.015 | -0.047 | -0.029 | 0.048 |
| 8:00 | 0.008 | 0.007 | 0.027 | 0.028 | 0.020 | -0.015 | -0.012 | -0.014 | 0.000 | 0.037 |
| 8:30 | 0.004 | 0.014 | 0.036 | 0.012 | 0.014 | -0.017 | -0.010 | -0.015 | 0.028 | 0.029 |
| 9:00 | -0.006 | 0.017 | 0.035 | -0.004 | 0.000 | -0.019 | -0.016 | -0.022 | 0.040 | 0.020 |
| 10:00 | -0.031 | 0.026 | 0.009 | -0.022 | -0.025 | -0.040 | -0.006 | -0.035 | 0.040 | 0.016 |

试验的结果表明,把非均匀地表作为等效均匀地表处理进行地面温度卫星反演是可行的.对一组实际的 GMS-5/VISSR 11 和 12 μm 通道卫星资料,在试验地区并非是真的均匀地表的情况下,用现在的二通道算法反演得到的陆面温度的精度相当或好于需要预先知道通道的地表比辐射率的分裂窗算法;另外,由白天和夜间二组卫星资料反演陆面温度的比较可见,尽管用于夜间的大气温度和湿度有较大的误差,但反演温度的偏差并不更大,表明反演结果的偏差并非完全是这一算法的反演误差,其中有一部分可能来自用以进行检验的实测陆面温度本身的误差.这表明了这种反演算法无论在均匀地表和非均匀地表的情况下都有实际应用的可能性.但是,在反演时需要给出的大气参数的误差对陆面温度的反演精度影响仍是明显的,特别是缺乏大气气溶胶的实时观测资料将对实际应用这种算法取得精确的陆面温度会造成一定的困难.

致谢 本工作使用的卫星资料、陆面温度测量资料、及大气探空资料由 Dr. Prata (CSIRO, Division of Atmospheric Research, Aspendale, Australia) 提供,在此表示感谢.

REFERENCES

- [1] Prata A J, Cechet R P. An assessment of the accuracy of land surface temperature determination from the GMS-5 VISSR. *Remote Sens Environ*, 1999, **67**: 1—13
- [2] Price J C. Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA-7/AVHRR. *J Geophys Res.*, 1984, **89**: 7231—7237
- [3] Prata A J. Land surface temperature derived from the AVHRR and ATSR 1. theory. *J Geophys Res.*, 1993, **98** (D9): 16689—16702
- [4] Becker F, Li Z L. Surface temperature and emissivity at various scales; definition, measurement and related problems. *Remote Sens Rev.*, 1995, **12**: 225—253
- [5] Coll C, Caselles V. A split window algorithm for land surface temperature from advanced very high resolution radiometer data: validation and algorithm comparison. *J Geophys Res.*, 1997, **102**: 16697—16713
- [6] Zhao G X, Wang H Q. Algorithms for determination of land surface temperatures and emissivities from satellite radiative measurements. *Chinese Science Bulletin*, 1998, **43** (15): 1303—1307
- [7] Wang H Q, Zhao G X, Wang L Z. Retrieval algorithm for land surface temperature and effect of atmospheric correction. *J Infrared Millim. Waves* (汪宏七, 赵高祥, 王立志. 陆面温度的反演算法和大气订正的影响. *红外与毫米波学报*), 2000, **19**(1): 48—52
- [8] Wang H Q, Zhao G X, Wang L Z. Effect of atmospheric aerosols on remote sensing of land surface temperature at infrared channels. *J Infrared Millim. Waves* (汪宏七, 赵高祥, 王立志. 大气气溶胶对用红外窗区通道遥感陆面温度的影响. *红外与毫米波学报*), 2001, **20**(4): 275—278
- [9] Kneizys F X, Shettle E P, Abreu L W, et al. *User's Guide to LOWTRAN 7, AFGL-TR-88-0177, Environmental Research Papers No. 1010*. Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, MA, 1988