

应用静止卫星热红外遥感亮温资料 反演地表温度的方法研究*

张元生^{1,2}, 郭晓², 张小美², 李明永²

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:双通道多时相反演方法在提取地表温度场时可把地表温度与地表发射率分离计算, 是利用静止卫星热红外遥感资料研究地表温度场变化的一种有效方法。该方法计算简单, 易于实现海量资料处理, 基本满足红外遥感资料在地震预报中的应用要求。

关键词:热红外遥感; 双通道多时相; 反演; 地表温度

中图分类号: TP751; P423.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2004)02-0113-05

0 引言

本文所使用的卫星热红外遥感资料来自风云二号 A 星, 它是中国的第一颗自旋稳定静止气象卫星, 定位于东经 105°, 每小时可获得对地观测圆盘图象一次。可见光波长范围 0.55 ~ 1.05 μm , 红外波长范围为 10.5 ~ 12.5 μm , 水汽波长范围为 6.2 ~ 7.6 μm 。星下点分辨率: 可见光 1.25 km, 红外及水汽为 5 km。白天观测的可见光图象可获得云顶及地表的反照率; 昼夜观测的红外图象可获得云顶及地表的红外辐射; 水汽图象可获得大气中的水汽含量。

地表温度是地表与大气相互作用过程中的一个重要的物理参数。陆面温度遥感反演一直是许多学者力图解决的一个难题。其难点在于 (1) 热红外遥感的大气影响十分复杂, 除了大气分子与悬浮粒的吸收作用和散射作用外, 大气的水汽和气溶胶既要吸收能量又要辐射能量, 这种大气自身的热辐射叠加于地面物体的热辐射信号之上, 使问题复杂化; (2) 热红外信息还受地表层热状况的影响, 比如微气象参数, 土壤参数, 植物覆盖状况、地表粗糙度、地形地貌等多种因素影响; (3) 地物存在着一个热储存和热释放的过程, 这个过程不仅与地物本身的热学性质有关, 还与环境条件等诸多因素有关, 整个热过程存在着“滞后”效应, 要定量地表达这一过程是相当复杂的; (4) 热能的传递有多种方式(传导、对流、辐射), 改变地物温度的因素除了热吸收与热辐射外, 还有显热交换与潜热交换, 它们都与天气、气候有关, 这几种热交换过程交织在一起难以区分和建立与温度的定量关系; (5) 热探测器所获得物体发射辐射信息包含物体的温度和物体的发射率, 两者的分离是热红外遥感的难点。尽管如此, 随着遥感技术的不断发展, 应用卫星红外资料对陆面温度的研究已取得了很大的发展, 如陆面“分裂窗口”方法使得陆面温度反演成为可能, 同时卫星红外遥感技术在地震预报中的应用已取得了一定程度的进展^[1,2]。

1 理论与方法

1.1 遥感基本原理

假设地表对热红外辐射具有朗伯体性质, 大气下行辐射强度在半球空间内为常数, 则热红外辐射的单

* 收稿日期 2004-02-03

资助项目: 国家“十五”科技攻关课题(2001BA601B02-02-05); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2004001

作者简介: 张元生(1965-), 男(汉族), 贵州湄潭人, 副研究员, 现主要从事地震波理论与应用、卫星红应用外遥感以及地震预报理论与方法研究。

色波传输方程^[3,4]可以写成为

$$L_{\lambda} = B_{\lambda}(T_s)\varepsilon_{s\lambda}t_{0\lambda} + \int_{0\lambda}^1 B_{\lambda}(T_z)dt_{\lambda} + (1 - \varepsilon_{s\lambda})t_{0\lambda}^2 \int_{0\lambda}^1 \frac{B_{\lambda}(T_z)}{t_{z\lambda}^2} dt_{\lambda}$$

其中 L_{λ} 为实测红外辐射量度; B_{λ} 为普朗克黑体辐射函数; T_s 为地表物理温度(辐射温度); T_z 为高度 Z 处的大气温度; $\varepsilon_{s\lambda}$ 为地表比辐射率; $t_{0\lambda}$ 为整层大气的总透射率; $t_{z\lambda}$ 为从高度 Z 处到大气上界的透射率。

以上方程右边第一项代表地表辐射; 第二项代表大气上行辐射; 第三项代表地表反射的大气下行辐射。若令

$$L_{0\lambda} = \int_{0\lambda}^1 B_{\lambda}(T_z)dt_{\lambda} \quad \tau_{\lambda} = \frac{t_{0\lambda}^2 \int_{0\lambda}^1 \frac{B_{\lambda}(T_z)}{t_{z\lambda}^2} dt_{\lambda}}{\int_{0\lambda}^1 B_{\lambda}(T_z)dt_{\lambda}}$$

可简化为

$$L_{\lambda} = B_{\lambda}(T_s)\varepsilon_{s\lambda}t_{0\lambda} + [1 + (1 - \varepsilon_{s\lambda})\tau_{\lambda}]L_{0\lambda}$$

式中 $t_{0\lambda}$ 、 τ_{λ} 和 $L_{0\lambda}$ 称为大气状态的函数。

遥感传感器接收的热红外辐射是宽通道信息,可看成是用传感器波长响应函数($R(\lambda)$)进行滤波的结果。为使用方便我们把第 i 通道的辐射传输方程仍写成以下形式:

$$L_i = B_i(T_s)\varepsilon_{s_i}t_{0_i} + [1 + (1 - \varepsilon_{s_i})\tau_i]L_{0_i}$$

其中

$$L_i = \frac{\int R(\lambda)L_{\lambda}d\lambda}{\int R(\lambda)d\lambda}$$

应用大气辐射传输程序 Lowtran 7 可计算出地表各点的辐射能传播路径上的大气状态参数。如果已知第 4、第 5 通道的地表发射率,可通过迭计算出地表辐射温度。但在一般情况下地表发射率是未知的,也就是说用两个方程解三个未知数(T_s 、 ε_{s4} 、 ε_{s5})有一定困难。另外地表发射率的变化对温度的影响较大,据研究地表发射率为 0.01 的误差可引起地面辐射温度(T_s)1K 的变化。因此我们提出了双通道多时相的反演方法。

1.2 双通道多时相反演方法

1.2.1 地表温度反演

“分裂窗”技术^[5,6]是利用两个相邻近的热红外光谱窗口辐射值,通过导出的地面发射率和地面温度的线性关系,得到由两个窗口区亮温(辐射温度)的线性组合表示的地面温度。其表达式为

$$T_s = a_0 + a_1T_4 + a_2T_5 \quad (1)$$

式中 T_4 、 T_5 分别是第 4、第 5 通道的亮温; a_0 、 a_1 、 a_2 与地表发射率和大气参数有关。虽然由不同应用提出不同思路,考虑不同因素的影响,但都有 $a_1 + a_2 = 1$ 的性质,因此可以构成一个方程组:

$$\begin{cases} T_s = a_0 + a_1T_4 + a_2T_5 \\ a_1 + a_2 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

应用地球静止卫星的热红外第 4、第 5 通道观测的亮温数据,据方程组(2)可以建立方程个数多于未知参数个数的方程组。地球静止卫星每 1 小时对地球观测一次,因此在夜间 23 时~第 2 天凌晨 5 时之间至少可以对地面进行 5 次观测。如果有 n ($3 \leq n \leq 5$) 次观测,就可构成由 $n+1$ 个方程构成的方程组,即

$$\begin{cases} T_s^i = a_0 + a_1T_4^i + a_2T_5^i & i = 1, 2, \dots, n \\ a_1 + a_2 = 1 \end{cases} \quad (3)$$

据研究,地表物体一般在当地时间 12~17 时之间温度达到最高,在夜间 23 时~第 2 天凌晨 5 时地表温度(辐射温度)变化缓慢^[7]。设这个时间段地表平均温度(辐射温度)为 T_s ,因此第 i 个时相的地面温度

(辐射温度)可表示为

$$T_s^i = d^i T_s \quad (4)$$

其中 d^i 为第 i 个时相的地面温度权重系数,可表示为

$$d^i = \frac{(T_4^i + T_5^i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_4^i + T_5^i)}$$

把式(4)代入方程组(3)得

$$\begin{cases} a_0 + T_4^i a_1 + T_5^i a_2 - d^i T_s = 0 & i = 1, 2, \dots, n \\ a_1 + a_2 = 1 \end{cases} \quad (5)$$

令

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T_4^1 & T_5^1 & -d^1 \\ 1 & T_4^2 & T_5^2 & -d^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & T_4^n & T_5^n & -d^n \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ T_s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

把方程(5)的矩阵形式为

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$$

做以下变换

$$\mathbf{A}^T \mathbf{Ax} = \mathbf{A}^T \mathbf{b}$$

式中 \mathbf{A}^T 是矩阵 \mathbf{A} 的转置矩阵,设 $\mathbf{R} = \mathbf{A}^T \mathbf{A}$, $\mathbf{B} = \mathbf{A}^T \mathbf{b}$ 得:

$$\mathbf{Rx} = \mathbf{B} \quad (6)$$

式中 \mathbf{R} 是一个 4×4 的方阵, \mathbf{B} 是一个由 4 个分量组成的向量。解方程组(6),可得向量 \mathbf{x} ,即常数 a_0, a_1, a_2 和未知参数 T_s 。利用表达式(4)可计算各时相的地表辐射温度。

1.2.2 计算地表发射率

为了进一步研究地表发射率,我们可以用以下数学公式^[6](Sobrino, 1991):

$$T_s = T_4 + A(T_4 - T_5) + B = B + (1 + A)T_4 - AT_5 \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= \frac{\alpha_5 \beta_4 + \beta_4 \beta_5 w}{Q}; \\ B &= \left(\frac{1 - \varepsilon_4}{\varepsilon_4} \right) \frac{\alpha_4 \beta_5}{Q} (1 - 2k_4 w) L_4 - \left(\frac{1 - \varepsilon_5}{\varepsilon_5} \right) \frac{\alpha_5 \beta_4}{Q} (1 - 2k_5 w) L_5; \\ a_i &= \varepsilon_i \gamma_i \cos \theta; \\ \beta_i &= k_i [1 + 2\gamma_i (1 - \varepsilon_i) \cos \theta]; \\ Q &= \alpha_4 \beta_5 - \alpha_5 \beta_4 \end{aligned}$$

式中 A 和 B 都与大气参数和地表发射率有关。大气参数可应用 Lowtran7 程序进行最小二乘线性回归获得。再进行式(1)和式(7)比较得方程 $a_1 = 1 + A$, $a_2 = -A$ 。解这两个方程可以得到第4、第5通道的地表发射率。

我们可应用 Becker 表达式近似地计算地表的发射率^[8],即

$$T_s = A_0 + P \frac{T_4 + T_5}{2} + M \frac{T_4 - T_5}{2} = A_0 + \frac{P + M}{2} T_4 + \frac{P - M}{2} T_5 = A_0 + A_1 T_4 + A_2 T_5 \quad (8)$$

式中系数分别为

$$A_0 = 1.274;$$

$$P = 1 + 0.15616 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} - 0.482 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2};$$

$$M = 6.26 + 3.98 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} + 38.33 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2};$$

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_4 + \varepsilon_5}{2}; \Delta\varepsilon = \varepsilon_4 - \varepsilon_5.$$

式(8)中 $A_1 + A_2 = P$, P 是一个与发射率有关的变量,在 $0.9 \leq \varepsilon \leq 1$ 和 $-0.01 \leq \Delta\varepsilon \leq 0.01$ 的条件下, P 不等于 1,即 $A_1 + A_2 \neq 1$,这是分裂窗口法不允许的。尽管如此, P 也是约等于 1 的,即 $|1 - P| < 0.03$ 。因此利用式(8)计算的地表发射率误差要比利用式(7)计算的地表发射率误差大一些,但利用式(8)中系数关系计算地表发射率不需要大气参数,计算大大简化。选择何种计算式,要视具体情况而定。

2 讨论

应用地球静止卫星的两个热红外通道在每天的特殊时间段内的多个时相观测数据进行反演,可以获得这个时间段内的地表辐射温度,不需要计算地表的发射率。地震监测与气象监测一样,需要连续观测,特别强调资料的连续和可比性,这就要求资料实时处理和实时分析。双通道多时相方法计算简单,易于实现海量的资料处理,初步达到了红外遥感资料在地震预报中的应用要求。

中国大陆已探明具有发生中强以上地震的活断层分布很广,尤其在青藏块体内部及周缘新构造运动十分强烈,地震活动频繁,地震强度大。在目前中国大陆西部地震监测能力差和地震预报不成熟的情况下,用静止卫星红外遥感数据来研究大范围地表温度场的连续变化,监测地表局部温度场变化中的地震前兆异常,具有很好的应用前景。

在利用静止卫星热红外遥感资料监测到某一地区的温度场发生了变化,我们可以调用较高分辨率的地球极轨卫星遥感资料来提高温度异常区的分辨。双通道多时相方法为应用极轨卫星热红外遥感资料反演地表温度提供了地表发射率的参考值或初始值,为提高反演精度和缩短反演计算时间提供了条件,是卫星热红外遥感在地震预报应用中的一种有效方法。

[参考文献]

- [1] 强祖基,徐秀登. 卫星热红外异常——临震前兆[J]. 科学通报,1990,35(17):1324-1327.
- [2] 强祖基,孔令昌,王弋平等. 地球放气,热红外异常与地震活动[J]. 科学通报,1992,37(24):2259-2262.
- [3] 柳钦火,徐希孺,陈家宜. 遥测地表温度与比辐射率的迭代反演方法[J]. 遥感学报,1998,2(1):1-8.
- [4] Zhao-Liang LI, F Becker, M P Stoll. Feasibility of Land Surface Temperature and Emissivity Determination from AVHRR Data, Remote sens [J]. Environ. ,1993,43:67-85.
- [5] A J Prata. Land Surface Temperatures Derived From the Advaned Very High Resolution Radiometer and the Along-Track Scanning Radiometer 1. Theory[J]. Journal of Geophysical Research,1993,98(D9):16689-16702.
- [6] J A Sobrino, C Coll, V Caselles. Atmospheric Correction for Land Surface Temperature Using NOLL-11 AVHRR Channels 4 and 5, Remote sens[J]. Environ. ,1991,38:19-34.
- [7] 陈华慧. 遥感地质学[M]. 北京:地质出版社,1984. 231-234.
- [8] F Becker, Zhang-Liang LI. Towards a local apilt window method over land surfaces[J]. Int. J. Remote sensing, 1990,11(3):369-393.

STUDY ON THE INVERSION METHOD OF LAND SURFACE TEMPERATURE BY APPLYING IR BRIGHT TEMPERATURE DATA OF STILL SATELLITE

ZHANG Yuan-sheng^{1,2}, GUO Xia², ZHANG Xiao-mei², LI Ming-yong²

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China ;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract :The inversion method of two-pass diversified temporal phases can calculate the land surface temperature and the land surface emissivity individually when attaining the land surface temperature, is a good way for researching the variation of land surface temperature field by applying IR data of still satellite. The method is easy to realize processing mass data with simple computation, and is able to fulfil request on applying IR data to earthquake prediction.

Key words :Hot-infrared remote sensing ; Two-pass and diversified temporal phases ; Inversion ; Land surface temperature