

红外遥感信息计算目标 温度场的研究

方 连 璋

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——本文提出了用三种不同类型的遥感信息计算地面目标温度场的模式，并用实验检验了计算的精度。

近年来，国外运用卫星遥感信息计算海洋表面温度的文献^[4~5]颇多，但如何运用航空遥感的红外信息计算地面各种目标的温度场还未见到报道。本文对这个问题作了研究，提出了三种不同类型的红外遥感信息的三种不同计算模式，并作了部分实验和计算。

一、具有内定标的红外遥感信息计算模式

图 1 为红外扫描仪信息记录格式，图中扫描角 $0^\circ \sim 4^\circ$ 为低温定标记录宽度； $9^\circ \sim 18^\circ$ 为灰级记录宽度； $19^\circ \sim 79^\circ$ 为地物信号记录宽度； $94^\circ \sim 98^\circ$ 为高温定标记录宽度。

定量记录的红外扫描仪，其基本原理是一种物扫描方式的成像辐射计。它具有两个温度可控的黑体板作为辐射参考源，两者的温度分别控制在地物信号的低辐射电平和高辐射电平之间。扫描

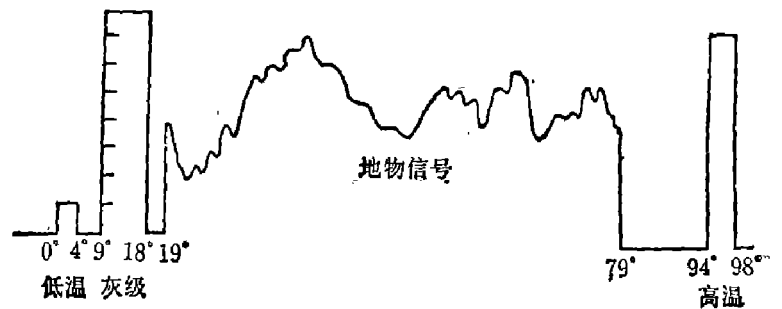


图 1 红外扫描仪信息记录格式

Fig. 1 Information forms of infrared scanner

仪的电子学设计保证辐射能量被光电探测器转换的电信号具有大动态范围的线性放大，并有直流分量恢复电路，使每次扫描的视频信号箝位在参考源的辐射电平上。阶梯波电压信号可作为两个参考源信号之间的内标值。因此，根据设定的辐射参考源可以求得各种地物目标的等效黑体温度值^[1~2]。

按普朗克公式，各种地物的辐射通量密度 W 与波长 λ 、绝对温度 T 之间有如下关系：

$$W_{\Delta\lambda} = \int_{\Delta\lambda} \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{\epsilon_{\Delta\lambda}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \cdot d\lambda; \quad (1)$$

本文 1985 年 11 月 18 日收到。

式中, $W_{\Delta\lambda}$ 为物体在 $\Delta\lambda$ 光谱范围内的辐射通量密度, $\epsilon_{\Delta\lambda}$ 为目标比辐射率。

根据式(1), 要获得绝对温度 T , 必须先获得 $W_{\Delta\lambda}$ 的值。可根据电子线路设计的原理, 使阶梯波产生的电信号与辐射通量密度呈线性关系。因此, 可建立如下关系式:

$$W_i = W_0 + K G_i \quad (2)$$

式中 W_i 为任何一点的辐射通量密度; W_0 为过渡能量函数, K 为比例系数。 G_i 值的计算可由拉格朗日插值公式获得

$$G_i = \sum_{j=1}^n \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \left(\frac{u - x_k}{x_j - x_k} \right) y_{ij} \quad (3)$$

式中, u 为任何地物信号电压值。从而根据(1)就可得到地面任何目标的辐射温度值。

二、具有实地定标点的红外遥感信息计算模式

红外探测器探测地物目标的自身辐射的光谱辐射功率 $P_{\Delta\lambda}$ 为^[1]

$$P_{\Delta\lambda} = \frac{D_0^2}{4} \omega \tau_{\alpha_{\Delta\lambda}} \tau_{0_{\Delta\lambda}} W_{\Delta\lambda} \quad (4)$$

式中, $W_{\Delta\lambda}$ 为 $\Delta\lambda$ 内的光谱辐射通量密度; D_0 为扫描仪的入瞳直径; ω 为瞬时视场立体角; $\tau_{\alpha_{\Delta\lambda}}$ 为目标与扫描系统间在波长 $\Delta\lambda$ 范围内的大气透过率; $\tau_{0_{\Delta\lambda}}$ 为光学系统自身的透过率。

在 $\Delta\lambda$ 波段内, 探测器产生的信号电压 V_s 为

$$V_s = \int_{\Delta\lambda} \delta R_{\Delta\lambda} P_{\Delta\lambda} d\lambda_i \quad (5)$$

式中, $R_{\Delta\lambda}$ 为红外探测器的波段响应率; V_p 为经过信号处理系统后的脉冲峰值; V_s 为未经信号处理系统的脉冲峰值; $\delta = V_p/V_s$ 为信号过程因子。

又, $F = f/D_0$, 则式(5)可变换为

$$V_s = \frac{\delta V_p D_0 \sqrt{\omega}}{4F \sqrt{\Delta f}} \int_{\Delta\lambda} \tau_{\alpha_{\Delta\lambda}} \tau_{0_{\Delta\lambda}} D_{\Delta\lambda}^* \epsilon_{\Delta\lambda} W_{\Delta\lambda} d\lambda_i \quad (6)$$

对于某一个传感器来说, 在某一波长范围内, $D_{\Delta\lambda}^*$ 、 $\tau_{0_{\Delta\lambda}}$ 均为常数, 又考虑离轴效应因子, 式(6)可变为

$$V_s = Q \cos \frac{\alpha}{2} \int_{\Delta\lambda} \epsilon_{\Delta\lambda} \tau_{\alpha_{\Delta\lambda}} W_{\Delta\lambda} d\lambda_i \quad (7)$$

根据上式, 只要有 2~3 个实地控制点, 运用计算机即可算出未知点的温度值 T 。

假若我们得到的是一张胶片或照片图象, 那么, 还需将式(7)获得的信号电压转换成光照射度, 才能对航空照片曝光。

假若红外扫描仪成象时的重叠率为 2/3, 则每个象点的曝光量增加 3 倍, 根据式(7)可得

$$H = 3mtQ \cos \frac{\alpha}{2} \int_{\Delta\lambda} \epsilon_{\Delta\lambda} \tau_{\alpha_{\Delta\lambda}} W_{\Delta\lambda} d\lambda_i \quad (8)$$

若选两个实地定标点, 解式(8)得

$$\lg H_1 - \lg H_2 = \lg \frac{\epsilon_{\Delta\lambda_1}}{\epsilon_{\Delta\lambda_2}} + \lg \frac{\tau_{\alpha_{\Delta\lambda_1}}}{\tau_{\alpha_{\Delta\lambda_2}}} + \lg \frac{\cos \alpha_1/2}{\cos \alpha_2/2} + \lg \frac{\int_{\Delta\lambda} W_{\Delta\lambda_1} d\lambda_1}{\int_{\Delta\lambda} W_{\Delta\lambda_2} d\lambda_2} \quad (9)$$

根据密度转换原理, 上式可变成:

$$\frac{D_1 - D_i}{\gamma_N} = \lg \left[\frac{\varepsilon_{\Delta\lambda_1} \tau_{\alpha_{\Delta\lambda_1}} \cos \alpha_1 / 2}{\varepsilon_{\Delta\lambda_i} \tau_{\alpha_{\Delta\lambda_i}} \cos \alpha_i / 2} \cdot \frac{\int_{\Delta\lambda} W_{\Delta\lambda_1} d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} W_{\Delta\lambda_i} d\lambda} \right]; \quad (10)$$

式中, γ_N 为底片的反差系数。若运用遥感照片, 则式(10)可变成

$$\frac{D_{\text{照}1} - D_{\text{照}i}}{-\gamma_P \gamma_N} = \lg \left[\frac{\varepsilon_{\Delta\lambda_1} \tau_{\alpha_{\Delta\lambda_1}} \cos \alpha_1 / 2}{\varepsilon_{\Delta\lambda_i} \tau_{\alpha_{\Delta\lambda_i}} \cos \alpha_i / 2} \cdot \frac{\int_{\Delta\lambda} W_{\Delta\lambda_1} d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} W_{\Delta\lambda_i} d\lambda} \right]; \quad (11)$$

式中, γ_P 为照片的反差系数, 负号说明密度与能量相反。式(10)、(11)均是温度 T 的函数, 因此, 只要利用三个地面控制点即可算出未知点的温度值 T 。

三、具有几个波段的红外遥感信息计算模式

当遥感信息中既无内定标, 又无实地定标时, 则只要有两个波段以上的红外信息, 同样可以获得目标的温度场数值。其理论根据是在传感器上获得的总的目标光谱辐射强度由四个部分组成^[2~5]: $I_s(\lambda, \theta)$ 为目标表面辐射强度; $I_a(\lambda, \theta)$ 为目标上面的大气辐射强度; $I_r(\lambda, \theta)$ 为反射各种环境目标向下的辐射强度; $I_h(\lambda, \theta)$ 为反射太阳辐射强度。则总的光谱辐射强度为

$$I_{\Sigma}(\lambda, \theta) = I_s(\lambda, \theta) + I_a(\lambda, \theta) + I_r(\lambda, \theta) + I_h(\lambda, \theta); \quad (12)$$

式中, θ 为反射的角度,

$$I_s(\lambda, \theta) = \varepsilon_s(\lambda, \theta) W(\lambda, T_s) \tau(\lambda, \theta, z); \quad (13)$$

式中, $W(\lambda, T_s)$ 为普朗克函数; $\tau(\lambda, \theta, z)$ 为大气透过率。

$$I_a(\lambda, \theta) = \int_{\Delta z} W[\lambda, T(z)] \tau(\lambda, \theta, z) dz; \quad (14)$$

式中, Δz 为仪器相对于目标的高度。

$$I_h(\lambda, \theta) = H_h(\lambda) \cos \theta_h \tau_{atm} \times \tau(\lambda, \theta, z) \rho_s(\lambda); \quad (15)$$

式中, $H_h(\lambda) = 2.16\pi \cdot 10^{-5} W(\lambda, T_h)$; θ_h 为太阳的高度角; τ_{atm} 为整层大气透过率, $\rho_s(\lambda)$ 为目标的反射率。

对于 $I_a(\lambda, \theta)$ 式的推导, 由图 2 可得到:

$$I_a(\lambda, \theta_r, \phi_r) = \tau(\lambda, z_s, \theta_r, \phi_r) \times \int_{\text{视场}} dA \int_{\text{半球}} d\Omega_i I_i(\lambda, \theta_i, \phi_i) \times \rho_s(\lambda, \theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \cos \theta_i; \quad (16)$$

式中, 大气向下辐射量 $I_i(\lambda, \theta_i, \phi_i) = I_a(\lambda, 0) / \cos \theta_i$; 目标的双向反射率 $\rho_s(\lambda, \theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \rho_s(\lambda)$; $d\Omega_i = \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i$ 。

对于 $\theta_r = \theta_i$, 式(16)可变为

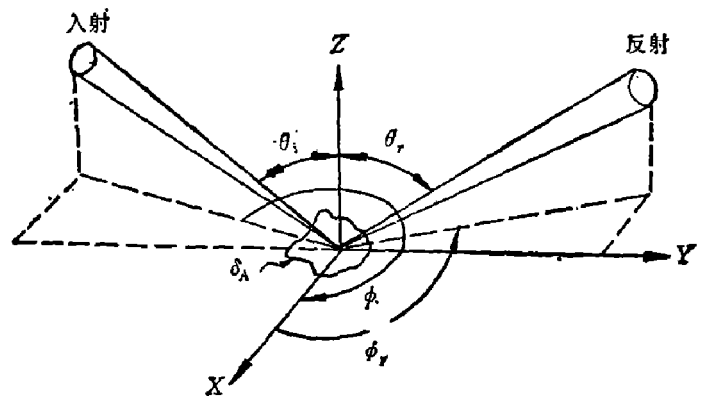


图 2 目标表面的入射反射特征

Fig. 2 The characteristics of incidence and reflection from the object surface

δ_{λ} —假设目标; θ_i —入射方向角; θ_r —反射方向角;
 ϕ_i —入射方位角; ϕ_r —反射方位角

$$I_a(\lambda, \theta) = 2\pi\rho_s(\lambda)I_s(\lambda, 0)\tau(\lambda, \theta, z) \quad (17)$$

当太阳垂直照射下,从式(12)得到:

$$I_{\Sigma}(\lambda) = \tau(\lambda, z_s) \{ \varepsilon_s(\lambda)W(\lambda, T_s) + [1 - \varepsilon_s(\lambda)]I'_a(\lambda) + H_h(\lambda) \cos \theta_h \rho_s(\lambda) \tau_{at} \} + I_s(\lambda) \quad (18)$$

若把大气衰减和发射率取平均值,上式经变换可得:

$$W(\lambda, T_s) = \frac{1}{\bar{\varepsilon}_s} \left\{ \frac{I_{\Sigma}(\lambda) - I_s(\lambda)}{\tau(\lambda, z)} - [1 - \bar{\varepsilon}_s(\lambda)]I'_a(\lambda) - H_h(\lambda) \cos \theta_h \cdot \rho_s(\lambda) \tau_{at} \right\} \quad (19)$$

式中,
$$I'_a(\lambda) = 2\pi \int_{dz} W[\lambda, T(z)] \tau(\lambda, \theta, z) dz$$

根据式(19),白天需要三个波段,而晚上只需要二个波段即可获得目标温度值 T_s 。

四、实验结果

实验数据取自上海技术物理研究所研制的 DGS-1 型红外扫描仪信息,该仪器具有红外六光谱及黑体内定标板。实验时,天气晴空无云,相对飞行高度为 1000 米。我们在实地按选定点运用红外辐射温度计及土壤温度计进行了准同步测量,其实验及计算结果见表 1。

表 1 测点的温度实测值与计算值对照表
Table 1 Actually measured and calculated temperature values

测点	目标类型	实测值(°C)	计算值(°C)			误差值(°C)		
			$T_{内定}$	$T_{实地定}$	$T_{多}$	$\Delta T_{内定}$	$\Delta T_{实地定}$	$\Delta T_{多}$
1	沙土	14.4	13.73	15.41	13.37	0.67	-1.01	1.03
2	粘土	13.3	12.63	13.71	12.44	0.67	-0.41	0.86
3	草地	12.6	12.84	11.91	11.71	0.76	0.69	0.89
4	水	12.1	11.34	11.41	11.21	0.76	0.69	0.89
5	柏油路	15.2	14.54	15.06	14.51	0.66	0.14	0.69
6	草地	12.6	11.84	11.91	11.71	0.76	0.69	0.89
7	粘土	13.3	12.63	13.71	12.55	0.67	-0.41	0.75

从表 1 计算可得,内定标法均方根误差是 0.71°C;实地定标法均方根误差是 0.83°C;多光谱法均方根误差是 0.86°C。

为了提高计算精度,在实验中应注意:正确记录参考源的温度数据,实行准同步的实地定标点的测试,定标点的面积应大于 10 个象元,认真收集当地的气候资料。假若在遥感应应用中能同时获得上述三种信号,并利用最小二乘法进行平差,则可以进一步提高地物目标温度的计算精度。

致谢——本文得到了世昌、薛永祺同志的审阅,并提出了宝贵意见;严晓海、陈中恩、罗霞芬等同志参加了野外测试实验,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] R. D. 小哈得逊著, 红外系统原理, 国防工业出版社, 1975, 21~22.
- [2] 方连璋等, 红外物理与技术, (1980), 6:19~24.
- [3] Price J. C., Rem. Sensing Environ, (1983), 13: 353.
- [4] Mcmillin L. M., *J. geophys Res.*, (1975), 80:5113.
- [5] Prabhakara C. et al., *J. geophys Res.*, (1974), 79:5039.

STUDY ON THE CALCULATION METHODS FOR THE TEMPERATURE PROFILE OF THE EARTH'S OBJECT BY USE OF INFORMATION OF INFRARED REMOTE SENSING

FANG LIANZHANG

(*Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

The calculation methods are presented to quantitatively explain the earth's object temperature profile by use of three kinds of different information of infrared remote sensing. The calculation accuracy is demonstrated by experimental data.