

文章编号: 1672-8785(2015)07-0021-06

基于气象参数的地物背景红外特征研究

陈 翀^{1,3} 刘中华² 林春生³

(1. 中国人民解放军 91336 部队, 河北 秦皇岛 066326 ;

2. 中国人民解放军 92054 部队, 福建 宁德 352103 ;

3. 海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 随着红外探测技术的飞速发展, 地物背景红外特征研究也具有越来越重要的军事意义。根据热平衡方程建立了地物背景表观温度的经验模型, 并推导出了与 4 种基本气象参数相关联的背景表观温度表达式。在此基础上, 运用最小二乘法对实测数据拟合出了未知参数 b_i ($i=1 \sim 5$)。经对比发现, 模拟结果与实测结果基本相符, 其误差控制在 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。模拟结果很好地反映出了背景表观温度的基本走势。在缺少有效观测手段时, 这种方法可以快速地对地物背景的表观温度给出较好的初步估计。通过误差分析, 发现环境温度的测量精度对背景温度计算精度的影响最为明显。

关键词: 地物背景; 红外特征; 气象参数; 最小二乘法; 温度场

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.07.005

Study of Infrared Characteristics of Ground-object Background Based on Meteorological Parameters

CHEN Xuan^{1,3}, LIU Zhong-hua², LIN Chun-sheng³

(1. Unit 91336 of the PLA, Qinhuangdao 066326, China;

2. Unit 920524 of the PLA, Ningde 352103, China;

3. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: With the rapid development of infrared detection technologies, the study of the infrared characteristics of ground-object background becomes more and more important militarily. An empirical model of the apparent temperature field of ground-object background is set up according to the heat balance equation and the expression of apparent temperature associated with four basic meteorological parameters is derived. On this basis, the unknown parameter b_i ($1 \sim 5$) is fitted for the measured data by the least square method. By comparison, it is found that the simulated result agrees with the measured result substantially. The error is controlled within 3.5. The simulated result reflects the tide of apparent temperature well. The method can give good estimation of the apparent temperature of ground-object rapidly. Through error analysis, it is found that the measurement accuracy of ambient temperature has the most evident influence on the calculation accuracy of background temperature.

Key words: ground-object background; infrared characteristics; meteorological parameter; least square method; temperature field

收稿日期: 2015-06-25

作者简介: 陈翀 (1981-), 男, 湖北武汉人, 工程师, 主要从事背景红外特征模拟及红外隐身方面的研究。

E-mail: amysand1116@163.com

0 引言

目标的红外热成像取决于目标和背景的辐射对比差异以及背景的散射强度。有种观点认为,如果一时难以准确地获得背景信息,则一般假定背景的表现温度与环境气温相近^[1]。但这种观点有时并不一定准确,因为背景的红外辐射特征因地而异,即使在同一地区不同植被所覆盖的地表的辐射特征也存在很大的差别。国内外各大研究机构对地表背景的红外特征进行了细致分析,并取得了一系列研究成果^[2-8]。

背景红外特征研究一般有两种方法:(1)通过建立数学模型来研究背景的热红外特征^[3-8];(2)根据某些理论方程(如热平衡方程)进行数据拟合^[2],从而建立经验模型。前者在对表面粗糙的物体(如耕地、草坪、农田)进行数学描述时显得相当麻烦,即使建立一个接近实际的模型,确定其相应的物理参数也非常困难。因此,本文采用第二种方法对地物背景的红外特征进行研究。

1 建立经验模型

根据能量守恒原则(忽略潜热换热),可以得出:

$$\alpha_s E_s + \alpha_l E_l - M_g - H - \theta_{cd} = 0 \quad (1)$$

式中, α_s 为太阳短波吸收率; E_s 为太阳球面辐照度; α_l 为长波吸收率,且 $\alpha_l = \varepsilon$, 其中 ε 为背景表面发射率; $E_l = f_1 \varepsilon_a \sigma T_a^4 + f_2 E_t$ 为长波辐照度,其中 f_1 和 f_2 分别为背景与天空及环境地势间的视场因子, ε_a 为大气发射率, σ 为玻耳兹曼常数, T_a 为大气温度, E_t 为地面辐照度; $M_g = \varepsilon \sigma T^4$ 为背景辐射度,其中 T 为背景温度; $H = h(T - T_a)$ 为对流换热强度,其中 h 为对流换热系数; θ_{cd} 为导热热量。

$$\theta_{cd} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{\lambda}{d} (T_c - T) = D(T_c - T) \quad (2)$$

式中, λ 为热导率; T_c 为深度 $x = d$ 处的恒定温度; $D = \lambda/d$ 。

根据文献^[1],可由式(1)推导出背景表面温度的表达式:

$$T = b_1 E_s + b_2 T_a + b_3 T_a \sqrt{e} + b_4 T_a v^n + b_5 \quad (3)$$

式中, b_i ($i=1 \sim 5$) 为常数; e 为水蒸气压; v 为环境风速; n 的取值范围为 $0.6 \sim 0.8$ 。

如果 $\varepsilon \approx 1$, 则背景的表现温度 $T_{ap} \approx T$ 。

将 $e = R_H e_s$ 代入式(3)后可得:

$$T_{ap} = b_1 E_s + b_2 T_a + b_3 T_a \sqrt{R_H e_s} + b_4 T_a v^n + b_5 \quad (4)$$

式中, b_i ($i=1 \sim 5$) 为未知系数; R_H 为相对湿度; $e_s = 1.831 \times 10^{-9} T_a \cdot \exp(0.06 T_a)$ 为饱和蒸汽压。

式(4)就是与4种气象参数(E_s 、 T_a 、 v 、 R_H)相关联的背景表现温度表达式。求出未知系数 b_i ($i=1 \sim 5$) 后,代入某一时刻的气象参数值就能计算出该时刻背景的表现温度。 b_i ($i=1 \sim 5$) 与背景的种类、季节、季候等因素密切相关,一般可通过用大量的实测数据对式(4)进行拟合得出。

2 实验设计

对4种气象参数(E_s 、 T_a 、 v 、 R_H)与背景表现温度 T_{ap} 进行长期的实地测量,建立数据库,并选取表1所示的片断数据。通过用大量实测数据对式(4)进行拟合,可以得出我们所需要的系数值 b_i ($i=1 \sim 5$)。受人力与物力的限制,本文研究仍处于起步阶段,数据库建立得还不够完整。其中,2014年9月30日和2014年10月10日的数据较为完整。为保证系数值 b_i ($i=1 \sim 5$) 的精确性,采用这两天的数据对式(4)进行最小二乘拟合。

本文选定的背景景物是白天由南方看过去的一小片草地,草长 h 为 $10 \sim 20$ cm,其表面辐射率 ε 的取值范围为 $0.85 \sim 0.95$ 。测温用红外热像仪的工作波段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 。计算中所用到的数据是在9月30日和10月10日分两天测得的。每天仅对白天(6:30 ~ 18:30)的数据进行测量(测量数据包括 E_s 、 T_a 、 v 、 R_H 和 T_{ap}),每次测量的时间间隔为30 min。9月30日,天空晴朗,阳光明媚,气温较高,风向由北转东南。10月10日与9月30日的天气情况相似,只是气温偏低一些,且午间部分天空有云。

试验设备或仪器包括:(1)HY2001G型红外热像仪(见图1),用于测量背景表现温度,其测

表 1 测量参数数据库

Date and Time	T_{ap} (°C)	E_s (W/m ²)	T_a (°C)	v (m/s ²)	R_H (%)
30, Sep, 6:30	14.8	0	17.0	2.0	99.0
30, Sep, 7:00	15.4	25	16.9	2.8	100
30, Sep, 7:30	16.5	80	17.1	2.2	100
30, Sep, 8:00	18.8	150	18.0	2.1	100
30, Sep, 8:30	20.0	175	19.0	2.1	99.0
30, Sep, 9:00	23.8	275	19.5	2.0	97.5
30, Sep, 9:30	25.0	350	20.7	2.5	95.0
30, Sep, 10:00	26.1	305	21.2	2.2	90.2



图 1 HY2001G 型红外热像仪

温范围为 $-20 \sim 500$ °C, 工作波段为 $8 \sim 14$ μm , 温度分辨率为 0.07 °C, 空间分辨率为 1 mrad; (2) 加野 6004 热线式风速计, 用于测量环境风速与风温, 其风速测量范围为 $0.1 \sim 20.0$ m/s, 风温测量范围为 $0 \sim 50$ °C, 风速测量精度为 $+0.1$ m/s, 风温测量精度为 ± 1 °C; (3) 干湿计, 用于测量环境的相对湿度。

3 试验数据拟合结果

基于 9 月 30 日和 10 月 10 日的测量数据, 通过用最小二乘法对式 (4) 进行拟合, 得出了两组系数值。经计算, 这两组系数值分别为

(1) 第一组系数值: $b_1 = 0.0165$, $b_2 = 0.9554$, $b_3 = 0.0095$, $b_4 = 0.0005$, $b_5 = -1.3172$ 。

(2) 第二组系数值: $b_1 = 0.0191$, $b_2 = 0.5955$, $b_3 = 0.0051$, $b_4 = 0.0045$, $b_5 = 107.7699$ 。

图 2 和图 3 所示分别为第一组和第二组系数对 9 月 30 日与 10 月 10 日背景景物的表观温度的估算结果。

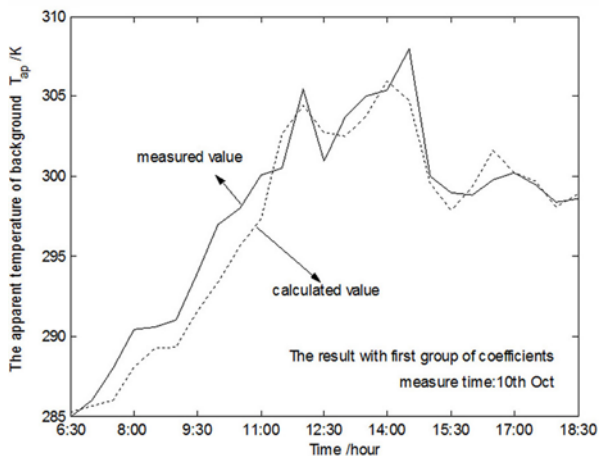
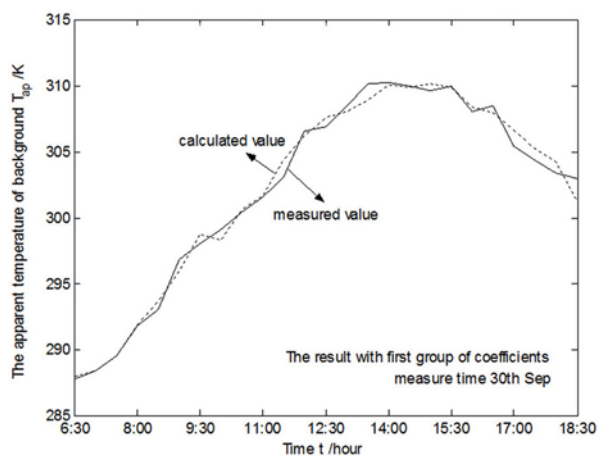


图 2 第一组系数对背景表观温度的计算结果

第一组系数值是依据 9 月 30 日的测量参数拟合得出的。在将这组系数值和 9 月 30 日的气象参数一起代入式 (4) 时, 得到的当天背景表观温度计算结果与实测结果较好吻合 (见图 2 的上半部分)。在将这组系数值和 10 月 10 日的气象参数一起代入式 (4) 时, 得到的当天背景表观温

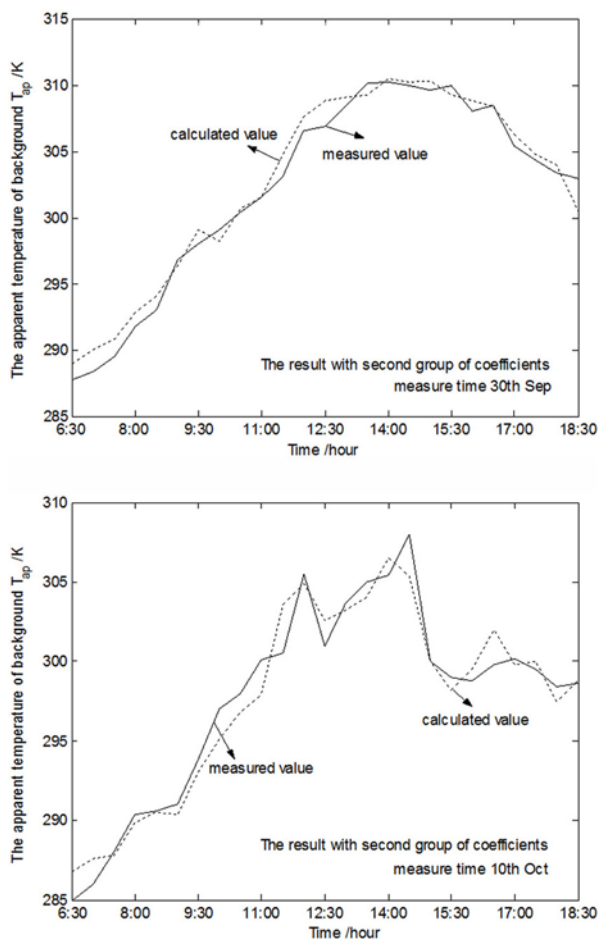


图3 第二组系数对背景表观温度的计算结果

度计算结果与实测结果之间存在一定误差(见图2的下半部分),但还是较为准确地显示出了背景表观温度的基本走势。在缺少有效观测手段时,这种方法可以快速地对背景表观温度给出较好的初步估计。

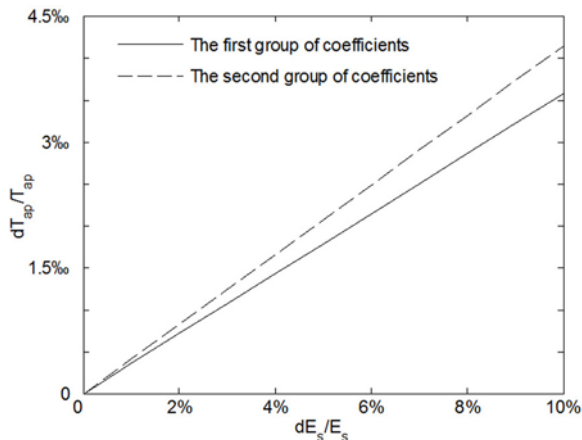


图4 dE_s/E_s 对 dT_{ap}/T_{ap} 的影响

第二组系数值是根据10月10日的测量参数拟合得出的。在利用这组系数值对9月30日的背景表观温度进行估算时,计算结果与实测结果较好吻合(见图3的上半部分)。相反,在对当天(10月10日)的背景表观温度进行估算时,计算结果与实测结果之间存在一定误差(见图3的下半部分)。经分析发现,误差存在的主要原因是10月10日当天的气象条件在较短时期内变化显著。

4 误差分析

在背景表观温度的表达式中,未知系数 b_i ($i=1 \sim 5$) 是通过大量测量参数拟合得出的,所以各参数的测量精度将会极大影响背景表观温度的模拟结果。现就各参量的测量误差对背景表观温度计算误差的影响进行分析。

对式(4)进行微分,然后整理得到:

$$\frac{dT_{ap}}{T_{ap}} = \frac{b_1 E_s}{T_{ap}} \cdot \frac{dE_s}{E_s} + \frac{0.5b_3 T_a e^{0.5}}{T_{ap}} \cdot \frac{dR_H}{R_H} + \frac{nb_4 T_a v^n}{T_{ap}} \cdot \frac{dv}{v} + \frac{(b_2 + 1.5b_3 e^{0.5} + 0.03b_3 T_a e^{0.5} + b_4 v^n)T_a}{T_{ap}} \cdot \frac{dT_a}{T_a} \quad (5)$$

假定 $T_a = 290 \text{ K}$, $v = 3 \text{ m/s}$, $n = 0.7$, $R_H = 80\%$, $E_s = 650 \text{ W/m}^2$, $T_{ap} = 300 \text{ K}$, 各参量的测量相对误差对背景表观温度相对误差的影响见图4~图7。

从图中可以看出,各个气象参数的测量精度都会影响背景表观温度的计算精度。按其影

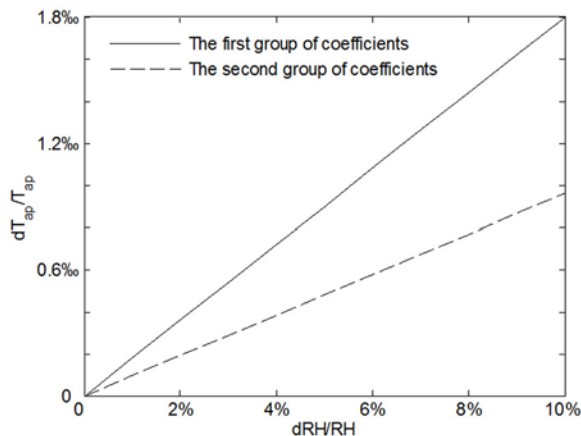
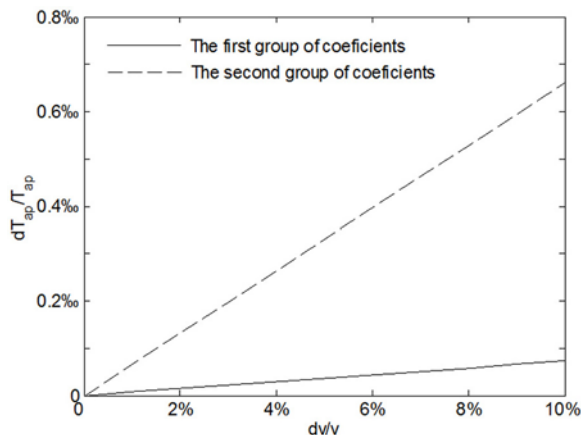
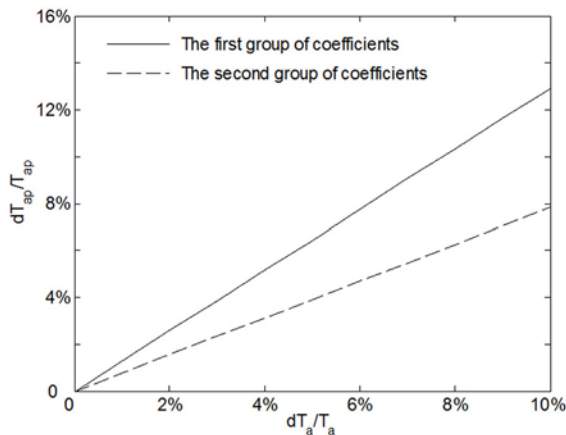


图5 dR_H/R_H 对 dT_{ap}/T_{ap} 的影响

图6 dv/v 对 dT_{ap}/T_{ap} 的影响图7 dT_a/T_a 对 dT_{ap}/T_{ap} 的影响

响程度从强到弱依次排列为环境温度 T_a 、太阳辐照度 E_s 、相对湿度 R_H 和环境风速 v 。若将相对误差换算为绝对误差,则环境温度 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测量误差将会导致背景表观温度 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的计算误差,所以在这四种气象参数中,环境温度的测量精度最为关键。

5 结束语

本文根据热平衡方程推导出了与4种气象参数相关联的背景表观温度表达式,然后通过用实测数据对其进行最小二乘拟合得到了未知参数 b_i ($i=1\sim 5$),最后对这四种气象测量参数进行了误差分析。

经对比发现,背景表观温度的模拟结果与实测结果基本相符,其误差控制在 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。计算结果较为准确地模拟出背景表观温度的基本走势。在缺少有效观测手段时,这种方法可以快速地对背景表观温度给出较好的初步估计。

气象参数是影响地物背景的背景温度的主要因素。但由于地物背景存在热惯性,其温度变化要迟于环境气象条件的变化,所以本文所建模型受气象条件的影响比较明显。当气象条件变化剧烈时,运用该模型所产生的误差有增大的趋势。

气象参数的测量精度会直接影响背景表观温度的计算精度。通过误差分析,发现环境温度

对背景表观温度的影响最为明显。同时,只有对影响背景表观温度的各个气象参数进行长期测量,获得准确的试验数据,建立完整的测量参数数据库,才能进一步提高本文的计算精度,从而获得适合各季节、各气象条件的背景表观温度表达式。

参考文献

- [1] Jacobs P M A. Simulation of the Thermal Behavior of an Object and Its Nearby Surroundings [R]. TNO Publication PHL-1980-08, 1980.
- [2] Balfour L S. A Simple Thermal Model for Natural Background Elements [C]. SPIE, 1995, 2426: 79-84.
- [3] 宣益民, 韩玉阁. 地面目标与背景的红外特征 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [4] 张建奇, 方小平, 张海兴. 自然环境地表红外辐射特性对比研究 [J]. 红外与毫米波学报, 1994, 13(6): 418-424.
- [5] 张建奇, 张海兴, 白长城, 等. 剩余阻抗在植被热红外辐射特性理论模拟中的应用 [J]. 红外与毫米波学报, 1995, 14(2): 119-124.
- [6] 张海兴, 张建奇, 白长城, 等. 含潜热能量的地表热平衡方程与统计解 [J]. 红外与毫米波学报, 1996, 15(3): 169-173.
- [7] 韩玉阁, 宣益民, 汤瑞峰. 丛林随机生成模型及其红外特征模拟 [J]. 红外与毫米波学报, 1999, 18(2): 299-304.
- [8] 韩玉阁, 宣益民. 天然地形的随机生成及其红外辐射特性研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2000, 19(2): 129-133.