

基于统一模型的典型地表 红外辐射特性对比研究*

杨德贵 黎 湘 庄钊文

†国防科学技术大学电子工程学院精确制导 ATR 国家重点实验室, 湖南, 长沙, 410073†

摘要 根据自然地表的稳态平衡方程, 将干燥裸地、潮湿裸地、低植被覆盖地表统一为一种模型, 综合考虑了各种自然因素, 采用了蒙特卡罗方法, 模拟了自然地表辐射温度的周期性变化以及各自然因素对红外辐射温度均值及其方差(起伏)的影响。实验结果表明此模型能较好地模拟这几种典型地表的红外热辐射特性。

关键词 自然地表, 辐射温度, 统一模型。

COMPARATIVE STUDIES OF IR RADIATION CHARACTERISTICS OF TYPICAL GROUND BASED ON A UNIFORM MODEL*

YANG De-Gui LI Xiang ZHUANG Zhao-Wen

(ATR Key Laboratory, National University of Defence Technology,
Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The uniform model of three kinds of typical grounds, i.e. dry bare ground, wet bare ground and ground covered by low vegetation, was constructed based on the heat balance equation of ground surface. All kinds of factors were under consideration. In calculation, the Monte-Carlo simulation was used to analyze the above natural ground's periodical infrared radiance statistics and the influence on the average value and variance (fluctuation) of the infrared radiation temperature caused by the above circumstance factors. The experimental results show that the model can simulate the infrared radiance statistics of the above typical ground fairly well.

Key words natural terrain, radiation temperature, uniform model.

引言

地表红外辐射特性研究在军事中有广泛的应用。例如: 地面目标探测的背景研究、地面军事目标的伪装研究和红外背景起伏抑制技术等。

地面红外辐射图象 E_r 正比于地表辐射 T , 因而 E_r 的统计特性就是 T 的统计特性^[1]。我们知道地表情况极其复杂, 在不同的时间、不同的地区, 地表的辐射特性差异很大。同时, 诸如地表含水量因子、风速等因素也随着时间、地形、地表的粗糙度、湍流以及温度分布的空间差异而变化的, 它们都会引起红外辐射的变化。因而, 在研究地表的热辐射特性时, 一般要求: 模型简单; 计算方便(公式简单); 能正

确反映地表辐射特性的变化。

本文主要针对三种不同的自然地表: 干燥裸地(如沙漠地表)、潮湿裸地(如泥泞地表)和低植被全覆盖地表(如草地地表), 将它们统一为一种简单的单层模型, 在此基础上着重分析了它们的辐射统计特性的周期性变化和起伏, 以及风速、空气相对湿度和地表含水量对它们的辐射统计特性的影响。

1 建立统一模型

我们用图 1 所示的单层模型^[2]来模拟干燥裸地、潮湿裸地和低植被全覆盖地表。图 1 中, R_n 为到达边界的净辐射, $\theta_{c,d}$ 为热传导通量密度, H 为边界层与参考高度处空气的感热交换, EL 为边界层与

* 国防预研基金(1A6.3.2)资助项目
稿件收到日期 2000-04-15, 修改稿收到日期 2000-08-10

* The Project supported by the Preliminary Research Foundation of National Defense (No. 1A6.3.2).

Received 2000-04-15, revised 2000-08-10

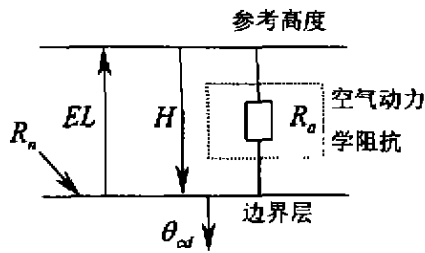


图1 单层统一模型

Fig. 1 One-layer uniform model

参考高度处的空气潜热交换, R_a 为空气动力学阻抗. 当地表为干燥裸地时, 此时模型中的 EL 部分即可去掉; 当地表为潮湿裸地和低植被全覆盖地表时, 只需将 EL 换为相应的表示式. 但需注意, 此时虚线框内的空气动力学阻抗 (R_a) 的表示形式也是不相同的.

上述模型中, $R_a = \theta_{sw} + \theta_{kz} + \theta_i$, 式中, θ_{sw} 为地表单位面积所吸收的太阳短波辐射功率, θ_i 为地表单位面积所吸收的大气长波辐射功率, θ_{kz} 为地表的幅出度.

2 地表稳态热平衡方程

根据红外辐射理论, 地表红外辐射由地表自身辐射和反射两部分组成, 对于通常的地物 ($8 \sim 14 \mu\text{m}$ 范围内), 其辐射主要取决于自身辐射, 反射可以忽略不计^[1]. 地表一方面吸收太阳的短波辐射能和长波辐射能; 另一方面通过传导、对流、蒸发以及辐射等方式和外界交换能量. 不同的地表, 产生主要作用的能量交换方式也不同. 一般而言, 地表热平衡方程为^[1]:

$$\theta_{sw} + \theta_{kz} + \theta_i - H + EL + \theta_{sw} = 0, \quad (1)$$

式(1)中的各具体项表示为:

$$\theta_{sw} = \alpha Q_{\text{sun}}(t); \quad \theta_i = \epsilon \sigma T_s^4; \quad \theta_{kz} = \epsilon R_a;$$

$$\theta_i = -\lambda_0 \frac{\partial T}{\partial z}; \quad H = \rho C_p \frac{T_s - T_a}{T_s};$$

其中 α 为地表的吸收率; ϵ 为地表表面发射率; λ 是土壤传导系数; σ 为波尔兹曼常数; k 为 karman 常数, 取为 0.11; T_s 为辐射温度; E_s, R_a 分别为到达地表处的太阳短波辐射能和大气长波辐射能; a, b 为经验常数; U_z, T_s 分别为离地面高度为 z 处的风速和气温; ρ 与 C_p 分别为空气密度和定压比热.

对于以上几种地表而言, 太阳短波辐射能量密度 (θ_{sw}), 大气长波辐射能量密度 (θ_i), 地表的幅出度 (θ_{kz}) 与热传导能量密度 (θ_{kz}) 近似具有相同的表示,

而空气动力学阻抗 (R_a) 和潜热通量密度 (EL) 在不同的地表情况下则具有很大的差异.

式(1)是和时有关的一个相当复杂的方程, 获得其解析解是相当困难的, 只能在分析各种具体情况时, 将方程作适当的简化, 以便求解具体的地表温度的分布特性. 对以下三种情况分别进行讨论:

2.1 干燥裸地(如沙地)的情况

对于干燥裸地, 此时 H 包含有分子的传导和湍流热交换的影响, 它有可能向下, 也有可能向上, 这取决于地表与大气的温度差. 在干燥无风区, 它是地表大气进行热交换的主要部分. 同时一般认为不存在潜热交换项 (EL)^[1], 因为它与其它的辐射能和感热交换密度相比甚小, 因而式(1)相应地可以简化为:

$$\theta_{sw} + \theta_{kz} + \theta_i + H + \theta_{sw} = 0.$$

2.2 潮湿裸地(如泥泞地表)的情况

对于潮湿地表而言, 我们不能忽略蒸发潜热项 EL 的影响, 因为它可以平衡掉很大部分太阳的辐射能量, 因而有^[3]:

$$EL = \rho L W'_{(w_s - w_a)} / R_a,$$

$$q_w = RH q_w(T_a),$$

$$R_a = \left[\ln \left(\frac{z_a}{z_0} \right)^2 \right] / k^2 U_a;$$

式中 RH 为空气的相对湿度; L 为汽化潜热; T_s 和 $q_w(T_s)$ 分别为参考高度处的大气温度和饱和比湿; $q_w(T_a)$ 是温度 T_a 时的饱和比湿; w_s 为地表含水量因子.

2.3 低植被覆盖地表(如草地)的情况

在低矮植被覆盖时, 蒸发潜热交换项除受到空气动力学阻抗的阻碍外, 还与植被层的气孔阻力有关, 我们令 $T_s = T_a + T_s$, EL 可以表示为:

$$EL = \frac{\rho L}{R_a} (\Delta(T_s - T_a) + \Delta T + (1 - RH)e_s^*),$$

$$\Delta = \frac{24630.93}{(235 + T_s)^2} \times 10^{\frac{7.457 T_s}{235 - T_s}},$$

$$R_a = \left[\ln \left(\frac{z_a - d}{z_0} \right)^2 \right] / k^2 \mu_a;$$

Δ 是饱和水汽压与温度关系曲线的斜率^[3].

2.4 简化后的辐射温度表示式

我们将以上的各式进行简化, 注意到 $f(t)$ 是太阳辐射能的时间变化函数, 因而可以令:

$$P_1 = \alpha Q_{\text{sun}} f(t);$$

$$P_2 = \epsilon R_a;$$

$$P_3 = \epsilon \sigma T_s^4;$$

$$P_1 = \frac{\rho C_p (T_0 - T_a)}{R_s};$$

$$P_2 = \frac{\rho C_p}{\gamma(R_a + R_s)} \Delta(T_0 - T_a);$$

$$P_6 = \frac{\rho C_p}{\gamma(R_a + R_s)} (1 - RH) e_s^2;$$

$$P_7 = 4\epsilon_s \sigma T_s^3;$$

$$P_8 = \lambda - \frac{\rho C_p}{R_a};$$

$$P_9 = \frac{\rho L W_s \Delta}{R_a};$$

$$P_{10} = \frac{\rho C_p \Delta}{\gamma(R_a - R_s)};$$

如此,可将 T 的表示用如下简式表达:

(1) 干燥裸地时:

$$T = \frac{P_1 - P_2 - P_3 - P_4}{P_5 + P_6}, \quad (2)$$

(2) 潮湿裸地时:

$$T = \frac{P_1 + P_2 - P_3 - P_4 - P_7 - P_8 - P_9}{P_5 + P_6 + P_{10}}, \quad (3)$$

(3) 低植被全覆盖地表时:

$$T = \frac{P_1 + P_2 - P_3 - P_4 - P_7 - P_8}{P_5 + P_6 + P_{10}}, \quad (4)$$

3 仿真参数及仿真结果

在实验中,几种不同地表的特征参量见表1.

其它的特征参量如下^[12]:

$$Q_{in,s} = 753 \text{ W m}^{-2}; \quad h = 0.2 \text{ m};$$

表1 几种不同地表的特征参量
Table 1 Characteristic Parameter of several kinds of different ground surface

类型	λ	ϵ	σ
干燥裸地(干沙)	0.251	0.80	0.10
潮湿地表(湿润土壤)	0.691	0.85	0.20
低植被全覆盖地表(草地)	0.27	0.95	0.75~0.85

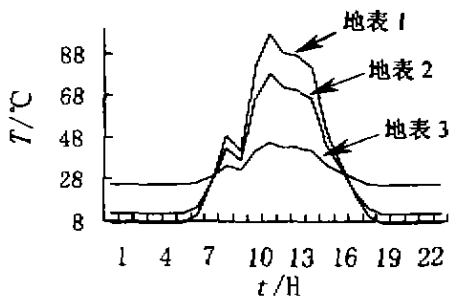


图2 三种地表辐射温度变化
Fig. 2 Variation of three kinds of ground's radiate temperature

$$q_s(T_s) = 0.0110S; \quad L = 2.49 \cdot 10^6;$$

$$z_1 = 20 \text{ m}; \quad z_2 = 0.13 \text{ h};$$

$$d = 0.56 \text{ h}; \quad T_0 = 300.0 \text{ K};$$

$$T = 303.2 \text{ K}; \quad e_s = 1670 \text{ Pa};$$

$$\epsilon = 0.95.$$

实验中,我们比较了各种地表的辐射温度的周期变化,同时还分析了一些主要的自然因素(例如:风速、地表反射率起伏以及空气相对湿度等)对地表辐射温度的影响.以下以地表1代替干燥裸地,地表2代替潮湿裸地,地表3代替低植被全覆盖地表.

图2~3为三种地表的温度的(1~2)阶矩,即温度的均值和方差.由图可以看出:(1)各种地形的温度基本是随太阳的日辐射的增加而增加的;(2)干地的温度变化最剧烈,湿地次之,低植被全覆盖地表最小;(3)干地在夜晚时温度几乎为零,而低植被全覆盖地表和湿地在夜晚由于存在潜热通量,因此温度较高;(4)低植被全覆盖地表的潜热通量与净辐射几乎完全可比拟,而湿地受潜热通量和感热的影响则比不上太阳的短波辐射的影响.

图4~5为三种地表分别在子夜的中午时温度随风速的变化情况,可以看出在子夜时有以下几个特点:(1)地表的辐射温度随风速的增大而升高;(2)低植被全覆盖地表的温度最高,湿地次之,而干地几乎为零;(3)低植被全覆盖地表温度随风速的变化较为剧烈,湿地次之.这是因为干地不存在潜变化热通量,一旦没有太阳辐射,则温度急剧下降,而湿地与低植被全覆盖地表在子夜时,它的感热与潜热通量使得温度保持在一定的范围内.基于同样的原因,在中午时有:(1)地表的辐射温度随风速的增大而降低;(2)潮湿地表的温度最高,干地次之,而低植被全覆盖地表最小;(3)湿地与低植被全覆盖地表温度的变化很大,而且湿地的温度平均比低植被全覆盖地表高.

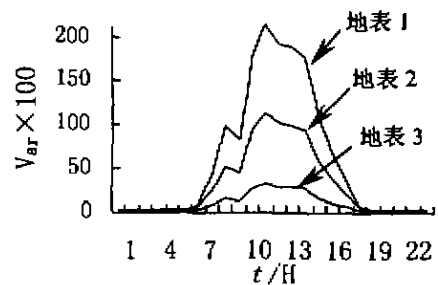


图3 三种地表辐射温度的起伏变化
Fig. 3 Fluctuation Variation of radiation temperature of three kinds of ground surface

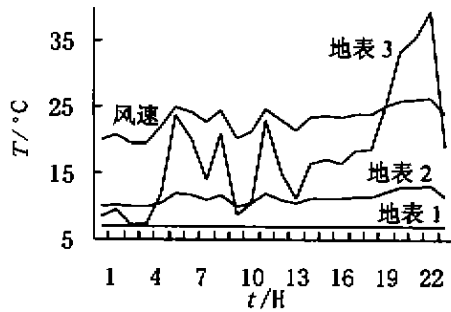


图4 辐射温度随风速的变化(子夜)
Fig. 4 Variation of radiation temperature with the speed of wind (at midnight)

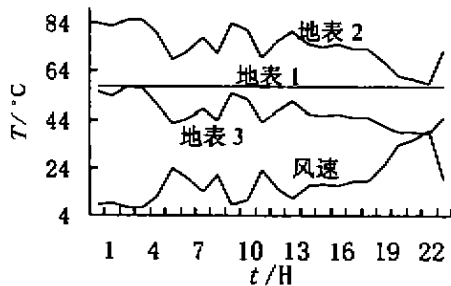


图5 辐射温度随风速的变化(中午)
Fig. 5 Variation of radiation temperature with the speed of wind (noon)

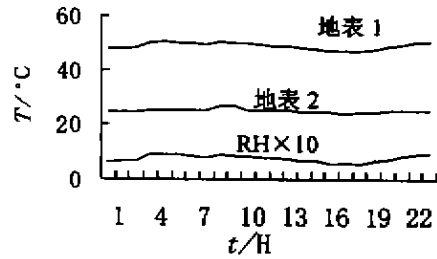


图6 辐射温度随空气相对湿度的变化
Fig. 6 Variation of radiation temperature with relative humidity of the atmosphere

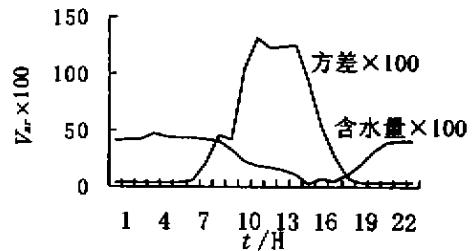


图7 湿地温度随地表含水量因子的起伏
Fig. 7 Variation of wet ground temperature with moisture of ground surface

图6为低植被全覆盖地表与潮湿地表的辐射温度均值随空气的相对湿度的变化,从图6可知,湿度温度的均值与相对湿度的变化基本一致,而低植被全覆盖地表的变化则不明显;低植被全覆盖地表的温度比湿地低,这是因为低植被全覆盖地表的感热与潜热通量对于地表温度的影响最为明显。

图7为湿地温度的起伏随地表的含水量因子的变化,图7为中午时的情况,此时地表含水量越小,潜热通量就越小,地表的辐射温度随潜热通量的增加而降低,实际上也是随地表含水量的增加而降低。

4 结语

本文在实验中将三种不同的地表(干燥裸地、潮湿裸地和低植被全覆盖地表)统一用一种简化的模型进行模拟,计算中采用了蒙特卡罗方法^[6](基于蒙特卡罗方法在处理多变量问题时的方便性),得到的仅是仿真结果,实验分析表明它能够正确地反映三种地表的热辐射特性,以后的研究还应该分析其它的地形(森林、灌木以及雪地等),因为这些地形都具有典型的代表性,可以模拟出一般的地带,从而有更大的实用价值。

REFERENCES

- [1] WEI He-Li, SONG Zheng-Fang. Influence of random wind field on the infrared radiance statistics distribution of natural terrain, *J. Infrared Millim. Waves* (魏合理, 宋正方, 随机风场对自然地表红外辐射统计分布的影响, *红外与毫米波学报*), 1995, 14(6): 424-428
- [2] SUI Hong-Zhi, TIAN Guo-Liang, LI Fu-Qing. Two-layer model for monitoring drought using remote sensing, *Journal of Remote Sensing* (隋洪智, 田国良, 李付琴, 农田蒸散双层模型及其在干旱遥感监测中的应用, *遥感学报*), 1994, 13(6): 220-224
- [3] ZHANG Jian-Qi, FANG Xiao-Ping, ZHANG Hai-Xin, et al. Comparative studies of the thermal IR radiation characteristics of different background under natural environment, *J. Infrared Millim. Waves* (张建奇, 方小平, 张海兴, 等, 自然环境下地表红外辐射特性对比研究, *红外与毫米波学报*), 1994, 13(6): 418-424
- [4] Kahle Anne B. A simple thermal model of the earth's surface for geologic mapping by remote sensing, *J. Geophys. Res.*, 1977, 82(11): 1673-1680
- [5] McGuire M J, Smith J A, Balick L K, et al. Modeling direction thermal radiance from a forest canopy, *Remote Sens. Environ.*, 1989, 27(2): 169-186
- [6] MA Wen-Gan, ZHANG Zi-Ping. *Computational Physics*. Hefei: Chin. Univ. Sci. Tech Press (马文焄, 张子平, 计算物理学, 合肥: 中国科学技术大学出版社), 1992: 12-78