

自然地表红外辐射特性统计分析*

张建奇 方小平 张海兴 杨 威

(西安电子科技大学技术物理系, 陕西, 西安, 710071)

朱长纯 ✓

(西安交通大学电信学院, 陕西, 西安, 710049)

TN215

摘要 利用 Monte-Carlo(M-C)方法,模拟计算了自然地表红外辐射的统计特性.根据地表能量热平衡方程,选取短波吸收率、长波发射率、风速以及热传导率(对光裸地表而言)和气孔阻力(对植被型地表而言)为独立的随机变量,并假设它们均服从正态分布,给出了自然地表温度的概率分布,讨论了这些随机变量的空间起伏和环境条件对植被红外辐射统计特性的影响.研究表明,在这些随机变量中,短波吸收率和风速对自然地表红外辐射统计特性的影响最大.

关键词 自然地表, 红外热图像, 辐射统计特性.

M-C方法

引言

自然地表红外辐射统计特性分析,对于目标与环境红外辐射特性研究,复杂背景中目标探测的算法研究,以及红外遥感图像的信息提取与应用分析技术等都很重要的,越来越受到人们的重视.近年来,关于裸露地表的红外热辐射统计特性的研究,已由干燥表面^[1~5]扩展到湿润地表^[6~7],并已建立了相应的分析模型,取得了重要的成果.对于植被覆盖的地表,红外辐射统计特性的研究已有报道^[8].但在上述研究中,除了对干燥地表的模拟研究,选取了 3 个独立随机变量外,其余都不超过 2 个.

自然环境中,湿润的裸露地表,除短波吸收率、长波发射率和热传导率随空间位置不同而有一定的变化外,近地表风速也会受地表状况的影响以及湍流交换的作用,沿表面具有一定的起伏.对于植被覆盖地表,由于植被结构特征、生理特性以及植被与大气间的湍流交换的影响,植被层的短波吸收率、长波发射率、气孔阻力以及近地表风速都会有一定空间起伏.这样,地表特性参数以及环境条件的随机起伏,将导致自然地表单元的红外辐射特性沿空间具有一定的统计分布.由此,利用统计方法研究地表红外辐射特性是一种符合实际的手段.本文根据自然地表的能量热平衡方程,选取以上参数为独立随机变量,假定它们服从正态分布,利用 M-C 方法模拟计算这些随机参量共同作用下,自然地表红外辐射的统计分布.给出了地表温度概率密度的拟合曲线,讨论了这些随机参数的空间起伏和环境条件对统计特性的影响.同时,对比分析了 M-C 方法和解析方法的模拟结果.

* 国家自然科学基金资助项目,编号 69377015

本文 1996 年 11 月 25 日收到,修改稿 1997 年 5 月 9 日收到

1 能量热平衡方程及温度解

在一定的假设前提下,自然地表单元的能量热平衡方程为

$$\alpha_g E_{sun} + \epsilon E_{sky} - M_g - H_g - LE_g - G = 0, \quad (1)$$

式(1)中, α_g 为地表单元的短波吸收率, E_{sun} 为太阳在地表上的辐照度, ϵ_g 为地表单元的长波发射率, E_{sky} 为天空在地表上的辐照度, M_g 为地表单元的辐出度, H_g 为地表单元与大气间的显热交换通量, LE_g 为地表单元与大气间的潜热交换通量, G 为地表单元向地下的热传导通量.对于光裸地表($g=s$)和植被完全覆盖地表($g=c$),式(1)左边前3项的计算表示式相同,而第4项和第5项不同.同时,对于植被完全覆盖的地表,热传导通量可忽略不计.下面对光裸和植被型地表分别给予描述.

1.1 光裸地表

对于光裸地表,设地表以下某一深度处的不变地温为 T_w ,取地表面温度 T_s 与 T_w 之差为 $T=T_s-T_w$,当考虑温度的线性近似时,有

$$M_s = \epsilon_s \sigma T_s^4 \approx \epsilon_s \sigma (T_w^4 + 4T_w^3 T), \quad (2)$$

式(2)中, σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数.

地表单元与大气间的显热交换能量 H_s 和潜热交换能量 LE_s 分别为^[9]

$$H_s = C_p \rho_a \frac{T_s - T_a}{R_{a0}} = C_p \rho_a \frac{T + T_w - T_a}{R_{a0}}, \quad (3)$$

$$LE_s = L \rho_a W_s \frac{\Delta_s (T_s - T_a) + D_s}{R_{a0}} = L \rho_a W_s \frac{\Delta_s (T + T_w - T_a) + D_s}{R_{a0}}, \quad (4)$$

式(3)和式(4)中, C_p 为干空气的定压比热, ρ_a 为空气密度, T_a 为空气温度, R_{a0} 为空气动力学阻力, L 为蒸发潜热, W_s 为表面含水量因子, Δ_s 为空气温度下的饱和比湿斜率, D_s 为空气比湿差.

热传导能量项的表示成为

$$G = \lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \approx \lambda \frac{T_s - T_w}{\Delta Z_w} = \lambda \frac{T}{\Delta Z_w}, \quad (5)$$

式(5)中, λ 为地表层热传导率, ΔZ_w 为地表表层厚度.将式(2)~式(5)代入能量热平衡方程式(1)中,并将 R_{a0} 与风速的关系^[10]代入,可解出温度 T 的表示式

$$T = \frac{a_1 a_2 + a_3 \epsilon_s + a_3 u_a}{b_1 \epsilon_s + b_2 u_a + b_3 \lambda}, \quad (6)$$

式(6)中, $a_1 = E_{sun}$, $a_2 = E_{sky} - \sigma T_w^4$, $a_3 = b_2 (T_a - T_w) - K_0^2 \rho_a L W_s D_s / \ln^2(z_a/z_0)$, $b_1 = 4\sigma T_w^3$, $b_2 = K_0^2 (\rho_a C_p + \rho_a L W_s \Delta_s) / \ln^2(z_a/z_0)$, $b_3 = \lambda / \Delta Z_w$.在系数 a_3 和 b_2 的表示式中, K_0 为Kaiman常数, z_0 为光裸地表粗糙度, z_a 为参考高度(即气象参数测量高度).

1.2 植被型地表

对于植被型地表,在某一时刻,可取植被层温度 T_c 与空气温度 T_a 之差为 $T=T_c-T_a$,当考虑温度的线性近似时有

$$M_c = \epsilon_c \sigma T_c^4 \approx \epsilon_c \sigma (T_a^4 + 4T_a^3 T), \quad (7)$$

植被层与大气间的显热 H_c 和潜热能量 LE_c 交换项分别为^[11]

$$H_c = C_p \rho_a \frac{T_c - T_a}{R_{ac}} = C_p \rho_a \frac{T}{R_{ac}}, \quad (8)$$

$$LE_c = \frac{C_p \rho_a \Delta_c (T_c - T_a) + D_c}{\gamma} = \frac{C_p \rho_a \Delta_c T + D_c}{\gamma}, \quad (9)$$

式(8)和式(9)中, R_{ac} 为空气动力学阻力, γ 为干湿表常数, Δ_c 为空气温度下的饱和水汽压斜率, D_c 为空气水汽压差, R_c 为植被叶片群体气孔阻力. 将式(7)~式(9)代入地表能量热平衡方程式(1)中, 并利用 R_{ac} 的表示式^[12], 有

$$T = \frac{a_1 \alpha_c + a_2 \epsilon_c (1 + cu_a R_c) + a_3 cu_a}{(b_1 \epsilon_c + b_2 cu_a)(1 + cu_a R_c) + b_3 cu_a}, \quad (10)$$

式(10)中, $a_1 = E_{sun}$, $a_2 = E_{sky} - \sigma T_a^4$, $a_3 = -\rho_a C_p D_c / \gamma$, $b_1 = 4\sigma T_a^3$, $b_2 = \rho_a C_p$, $b_3 = \rho_a C_p \Delta_c / \gamma$, $c = K_0^2 / \ln^2((z_a - d)/z_{0c})$. 在系数 c 的表示中, d 为零平面位移, z_{0c} 为植被层表面粗糙度.

2 Monte-Carlo 模拟

由于地表特征参数 $\alpha_c, \epsilon_c, \lambda, \alpha_c, \epsilon_c, R_c$ 以及环境参量 u_a 沿空间位置的起伏变化, 由式(6)和式(10)可知, 地表单元温度也有一定的变化. 地表红外辐射亮度正比于地表辐射温度, 见式(2)和式(1), 因此, 地表温度 T 的统计特性就是地表辐射的统计特性. 设参数 $\alpha_c, \epsilon_c, \lambda, \alpha_c, \epsilon_c, R_c$ 以及 u_a 为相互独立的随机变量, 由式(6)和式(10)可见, T 是关于随机变量的复合函数, 若这些随机变量的分布函数已知, 从理论上即可求出 T 的概率密度分布. 但在实际计算中, 由于随机变量数的增加以及 T 与这些随机变量函数关系的复杂性, 往往很难得出 T 的概率密度分布解析表示式. 因此, 本文采用 M-C 模拟方法计算 T 的概率分布并拟合 T 的概率密度分布函数. 设 $\alpha_c, \epsilon_c, \lambda, \alpha_c, \epsilon_c, R_c$ 以及 u_a 服从正态分布, 即: $\alpha_c \sim N(\langle \alpha_c \rangle, \sigma_{\alpha_c}^2)$, $\epsilon_c \sim N(\langle \epsilon_c \rangle, \sigma_{\epsilon_c}^2)$, $\lambda \sim N(\langle \lambda \rangle, \sigma_{\lambda}^2)$, $\alpha_c \sim N(\langle \alpha_c \rangle, \sigma_{\alpha_c}^2)$, $\epsilon_c \sim N(\langle \epsilon_c \rangle, \sigma_{\epsilon_c}^2)$, $R_c \sim N(\langle R_c \rangle, \sigma_{R_c}^2)$ 以及 $U_a \sim N(\langle U_a \rangle, \sigma_{U_a}^2)$, 其中 $\langle X \rangle$ 表示 X 的均值, σ_x^2 为相应方差. 模拟过程中, 先由计算机产生 7 个均值和方差, 分别为 $\langle X \rangle$ 和 σ_x^2 的正态分布的随机数 X , 然后按式(6)和式(10)分别计算 T , 并以统计分析得到 T 的概率密度分布和相应均值与方差. 图 1 给出了裸地表面温度 T 和植被层表面温度 T 的概率密度分布, 其中散布点为 M-C 模拟结果, 实线为拟合的正态分布曲线. 模拟中随机试验数取 20000, 其余参数为: $T_a = 22.0$ (°C), $T_w = 18.0$ (°C), $RH = 60.0\%$, $P_a = 972.0$ (hPa), $E_{sun} = 670.0$

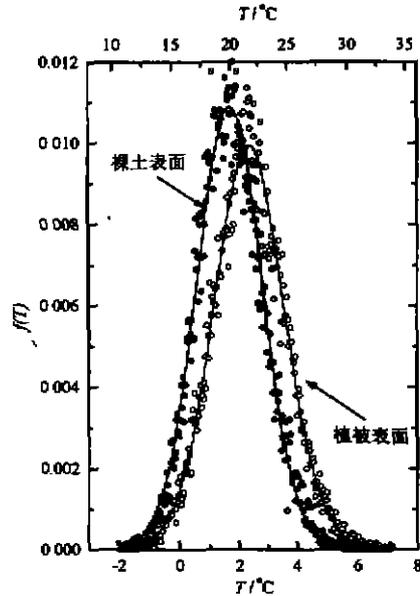


图 1 地表温度概率密度分布
Fig. 1 Radiative temperature probability density

($\text{w} \cdot \text{m}^{-2}$), $E_{\text{sky}} = 368.0 (\text{w} \cdot \text{m}^{-2})$, $z_0 = 0.002 (\text{m})$, $z_{0c} = 0.13 (\text{m})$, $z_a = 2.0 (\text{m})$, $d = 0.56 (\text{m})$, $\langle \alpha_s \rangle = 0.60$, $\langle \epsilon_s \rangle = 0.90$, $\langle \lambda \rangle = 0.691 (\text{w} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1})$, $\langle \alpha_c \rangle = 0.65$, $\langle \epsilon_c \rangle = 0.95$, $\langle R_c \rangle = 250 (\text{sm}^{-1})$, $\langle u_a \rangle = 3.0 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$, $\sigma_{\alpha_s} = 0.1$, $\sigma_{\epsilon_s} = 0.1$, $\sigma_{\lambda} = 0.1$, $\sigma_{\alpha_c} = 0.3$, $\sigma_{\epsilon_c} = 0.05$, $\sigma_{R_c} = 15$, $\sigma_u = 0.3$.

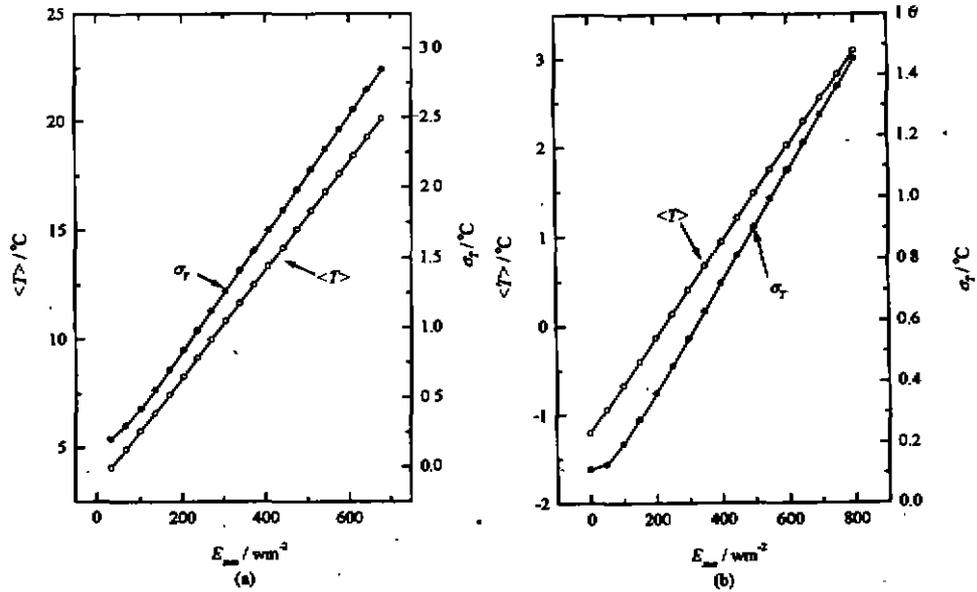


图2 太阳辐射对地表温度统计特性的影响
(a) 裸土表面 (b) 土壤表面

Fig. 2 Average and standard deviation of the radiative temperature vs E_{sun} (a) for bare soil surface, (b) for vegetation canopy

3 结果和讨论

根据方程(6)和(10),我们模拟计算了地表温度的均值 $\langle T \rangle$ 和标准差 σ_T 随外部辐射源(太阳辐照度 E_{sun})和环境条件(风速 u_a)的变化.图2示意了裸土表面(a)和植被层表面(b)的温度均值 $\langle T \rangle$ 随太阳辐照度 E_{sun} 近似线性地增大.同时,地表温度标准差 σ_T (与热红外图像对比度成正比关系)也随 E_{sun} 增大而近似地线性增加.这预示着在相同的地表参数和环境参数空间起伏下,强日光照射下的地表红外图像对比度要比弱光下大.另外,比较图2(a)和图2(b)可以发现,在相同光照下,裸露地表受外部热辐射源的影响比植被型地表要大,而红外图像对比度前者要比后者强.

图3表明随风速 u_a 的增加,地表温度均值 $\langle T \rangle$ 和标准差 σ_T 均快速减小.这表明较大的风速,不但可使地表与大气间的热和水汽交换增加,使得地表平均温度降低,同时,可以抑制地表温度的空间起伏,使地表热红外图像对比度降低.另外,从图(3)中可见,风速对裸露地表图3(a)的影响要经植被型地表图3(b)大很多.

为了考查地表红外辐射统计特性对不同随机变量的灵敏情况,模拟中还选择了不同参数进行了对比分析.对于裸露的地表,结果如图4所示,图4中各字母分别对应于以下情形:
a~($\sigma_{\alpha_s} = 0.1, \sigma_{\epsilon_s} = 0.1, \sigma_{\lambda} = 0.1, \sigma_u = 0.3$); b~($\sigma_{\alpha_s} = 0.1, \sigma_{\epsilon_s} = 0.1, \sigma_{\lambda} = 0.0, \sigma_u = 0.0$); c~(σ_{α_s}

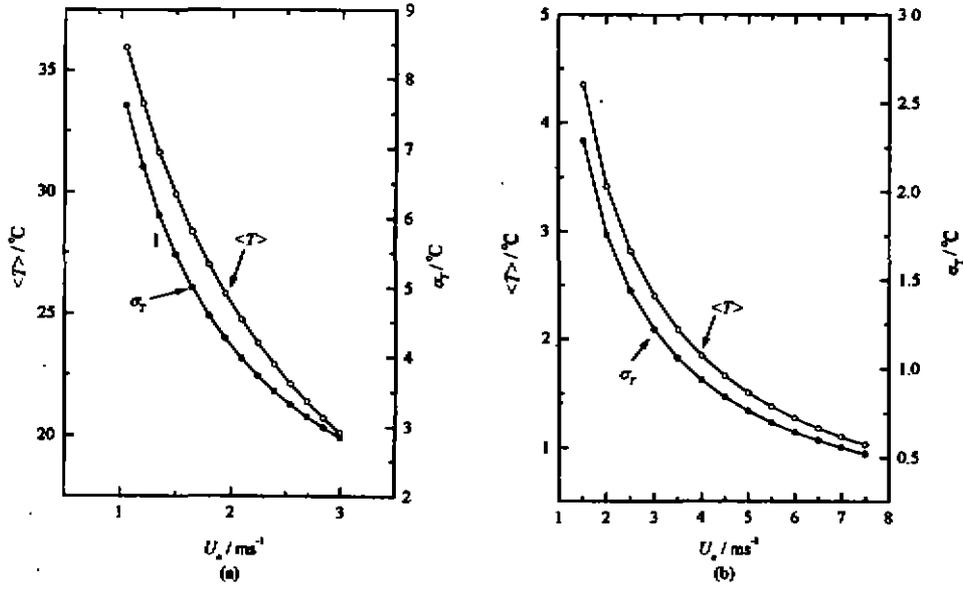


图3 风速对地表温度统计特性的影响
 (a) 裸土表面 (b) 植被表面

Fig. 3 Average and standard deviation of the radiative temperature vs U_s , (a) for bare soil surface, (b) for vegetation canopy

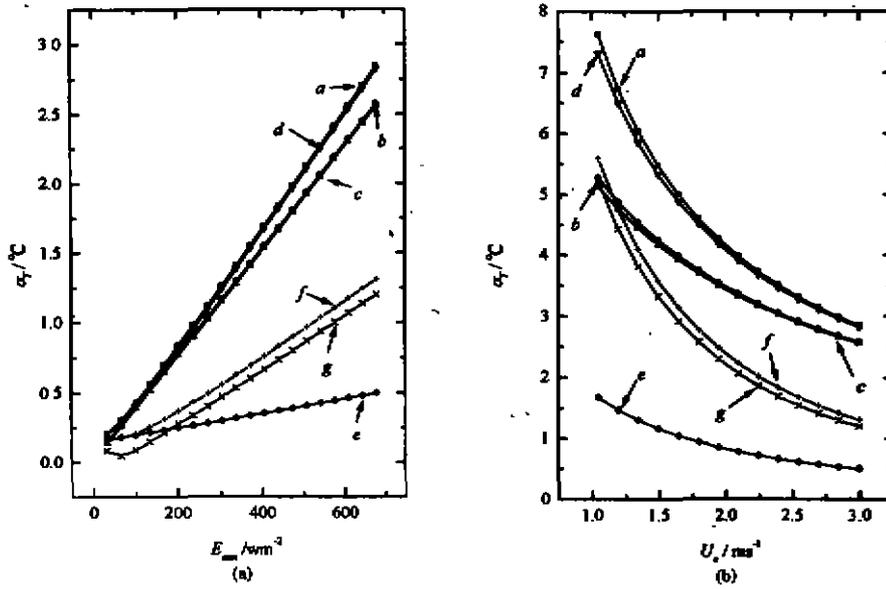


图4 不同随机变量作用下的地表温度统计特性
 (a) 太阳辐照度 (b) 风速

Fig. 4 Standard deviation of the radiative temperature (a) vs E_{sun} , (b) vs U_s for different cases

$= 0.1, \sigma_{\alpha} = 0.0, \sigma_{\lambda} = 0.1, \sigma_{\kappa} = 0.0$); $d \sim (\sigma_{\alpha} = 0.1, \sigma_{\alpha} = 0.0, \sigma_{\lambda} = 0.0, \sigma_{\kappa} = 0.3)$; $e \sim (\sigma_{\alpha} = 0.0, \sigma_{\alpha} = 0.1, \sigma_{\lambda} = 0.1, \sigma_{\kappa} = 0.0)$; $f \sim (\sigma_{\alpha} = 0.0, \sigma_{\alpha} = 0.1, \sigma_{\lambda} = 0.0, \sigma_{\kappa} = 0.3)$; $g \sim (\sigma_{\alpha} = 0.0, \sigma_{\alpha} = 0.0, \sigma_{\lambda} = 0.1, \sigma_{\kappa} = 0.3)$. 很明显, 情形 d 与 a 最接近, 这说明短波吸收和风速是影响最大的随机变量. 由于 d 情形下可以获得地表温度统计分布概率密度的解析表达式^[6~7], 据此可以检验 M-C 模拟方法的准确性. 结果如图 5 所示, 这表明 M-C 方法在模拟多随机变量情况下的地表红外辐射统计特性是非常适用的. 对于植被型地表, 结果是相同的, 即短波吸收率和风速是最重要的随机变量. 模拟表明, 当 σ_{α} 增加 100% 时, σ_T 仅改变 3%, 而 σ_{κ} 减少 10% 时, σ_T 仅变化 0.15%.

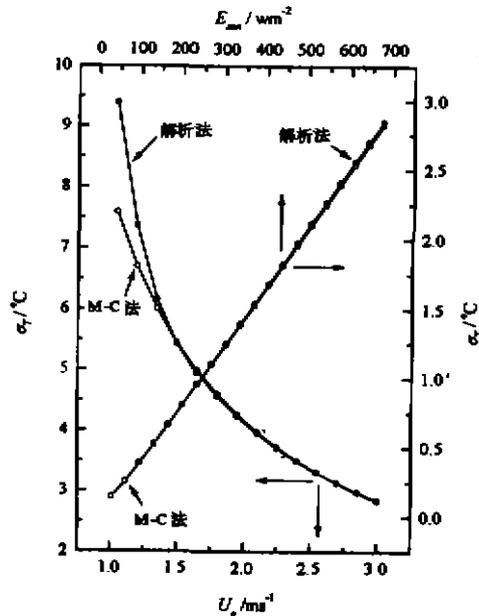


图 5 M-C 法与解析法比较
Fig. 5 The comparison of analytical method with M-C method in standard deviation of radiative temperature

由于 M-C 方法不受随机变量数的限制, 当概率密度解析表示式的推导十分复杂或根本无法获得时, M-C 方法则简化了计算, 这在地表红外辐射统计特性模拟分析上是特别有用的.

参考文献

- 1 Ben-Yosef N, et al. *Appl. Opt.*, 1985, 24(23): 4167
- 2 Ben-Yosef N, et al. *SPIE*, 1987, 819: 66
- 3 Ben-Yosef N, et al. *Appl. Opt.*, 1985, 24: 141
- 4 饶瑞中, 宋中文. *红外与毫米波学报*, 1991, 10(2): 141
- 5 董国权, 李正直. *红外与毫米波学报*, 1993, 12(6): 459
- 6 魏合理, 宋正方. *红外与毫米波学报*, 1995, 14(6): 424
- 7 张海兴, 张建奇, 白长城, 周荣星. *红外与毫米波学报*, 1996, 15(3): 169
- 8 Guoquan D, Zhengzhi L. *Infrared Phys.*, 1993, 34(4): 471
- 9 Businger J A. *Am. Meteorol. Soc.*, 1973, 67~98
- 10 Pieke P A, et al. *Atmos. Sci.*, 1975, 32: 2288
- 11 van de Griend A A, et al. *Water Resource Res.*, 1989, 25: 949~971
- 12 Wallace J S, et al. *Agric. For. Meteorol.*, 1984, 32: 298

A THEORETICAL MODEL FOR IR RADIANCE STATISTICS OF NATURAL TERRAIN*

Zhang Jianqi Fang Xiaoping Zhang haixing Yang Wei

(Technical Physics Department, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Zhu Changchun

(School of Electronics & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract A theoretical model for IR radiance statistics of natural terrain was presented by using Monte-Carlo simulation. The model is based on the heat balance equation of the natural terrain and the assumption that the short-wavelength absorptance, long-wavelength emissivity, wind speed and heat conductivity (for bare soil) or bulk stomatal resistance (for vegetation canopy) are random, uncorrelated variables with normal distribution densities. The results show that due to nonlinear coupling of the temperature to the thermal properties and heat source, the radiance distribution varies in a complex manner while the heat source changes. In the random variables selected, the influence of the field fluctuation in the short wavelength absorptance and wind speed on the statistical nature of the vegetation canopy is most obvious.

Key words natural terrain, IR thermal image, radiative temperature statistics.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China