

# 天然地形的随机生成及其红外辐射特性研究\*

韩玉阁 宣益民

(南京理工大学动力工程学院, 江苏, 南京, 210094)

FN 215

**摘要** 采用概率统计方法和分形技术两种随机生成方法构造了天然地形的模拟图像;运用传热原理建立了天然地形红外热图像计算模型,探讨复杂地形红外热图像的简化计算方法,并将计算结果附于随机生成的天然地形图像之上,生成了天然地形的红外模拟。

**关键词** 红外辐射特性,天然地形,随机生成.

424.

## RANDOM GENERATION OF NATURAL TERRAIN AND ITS IR FEATURE SIMULATION \*

HAN Yu-Ge XUAN Yi-Min

(School of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** Both the statistical method and the fractal theory were used to numerically construct the simulated images of natural terrains. The IR feature model of natural terrains was established by using the principle of heat transfer, and a simple algorithm was proposed to calculate the IR irradiance of complex terrains. The IR images of natural terrains were simulated by embodying the numerical results of infrared radiation in the generated geometrical pictures of natural terrains.

**Key words** infrared radiation characteristics, natural terrain, random generation.

### 引言

随着红外遥感技术的发展,红外遥感技术越来越多地用于探测天然地形的植被类型分布和土壤类型分布,要探测植被类型和土壤类型,首先应该了解每一类型植被和土壤的红外辐射特征,目前国内外学者对此进行了大量的研究<sup>[1-3]</sup>,并取得了一定成果;另外一些学者对天然地形的几何生成进行了研究<sup>[4]</sup>,也有一些学者利用统计方法对二维地表红外图像进行了模拟生成<sup>[5]</sup>,但对天然地形三维红外辐射特征及其红外图像的生成,目前研究的还较少,本文结合地形几何生成技术和地面红外辐射理论模型,研究天然地形三维红外辐射特征及其红外图像的生成计算,取得了初步成果。

### 1 天然地形的随机生成

#### 1.1 天然地形的地形随机生成方法之一: 概率统计

地面相邻两点的高度是空间相关的,相关函数可表示为:

$$\langle H(R+r) * H(R) \rangle = \varphi(r) = \sigma^2 \exp(-ar). \quad (1)$$

式(1)中  $r$  为两点间的相对距离,  $a$  为相关长度的倒数,  $\sigma$  为高度均方根误差。天然粗糙地形的高度服从  $N$  维正态分布,  $N$  维随机变量  $(H_1, H_2, \dots, H_N)$  指某一特定地形区域均匀分布的  $N$  个几何位置的高度值组成的数列,它们服从同样的正态分布,为讨论方便,假设其平均值为 0, 则其联合密度函数具有如下形式<sup>[5]</sup>:

$$P(\beta) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^N \sqrt{\det(\vec{V})}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \vec{\beta}^T \vec{V}^{-1} \vec{\beta}\right\}, \quad (2)$$

式(2)中:  $\vec{\beta} = (H_1, H_2, \dots, H_N)$ ,  $\vec{\beta}^T$  是  $\vec{\beta}$  的转置矢量,  $\vec{V} = (H_i * H_j)$ , 可由相关函数  $\varphi(r)$  确定。例如,取方形区域的边长为  $L$ , 每边进行  $N$  等分, 步长为  $\Delta X$ , 则可以利用条件概率  $P(H_m | H_1, \dots, H_k)$  来确定高度。本文利用已知两点的高度确定第 3 点的高度, 即第 3 点满足

\* 国防预研基金(编号 98. J3. 3. 2. BQ0202)资助项目  
稿件收到日期 1999-03-03, 修改稿收到日期 1999-11-16

\* The project supported by the Preliminary Research Foundation of National Defense(No. 98. J3. 3. 2. BQ0202).  
Received 1999-03-03, revised 1999-11-16

如下条件概率<sup>[5]</sup>:

$$P(H_4|H_2, H_3) = \frac{P(H_2, H_4, H_3)}{P(H_2, H_3)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma\eta}} \exp\left[-\frac{C(H_4)}{2\sigma^2\eta^2}\right], \quad (3)$$

式(3)中:

$$\eta = \frac{1+\omega\sqrt{1-2\omega^2}}{1+\omega\sqrt{1-\omega^2}},$$

$$C(H_4) = \left\{ H_4 - \frac{\omega}{1+\omega\sqrt{1-\omega^2}} H_2 - \frac{\omega}{1+\omega\sqrt{1-\omega^2}} H_3 \right\}^2,$$

$$\omega = \exp(-\alpha\Delta X),$$

给定  $H_2, H_3$ , 则  $H_4$  服从如下正态分布, 其平均值为

$$\langle H_4 \rangle = \frac{\omega}{1+\omega\sqrt{1-\omega^2}} H_2 + \frac{\omega}{1+\omega\sqrt{1-\omega^2}} H_3, \text{ 标准均方根误差为 } \sigma = \sigma\eta,$$

然后利用正态分布随机数生成方法即可生成  $H_4$ . 然后依次平移各点, 再计算新的  $H_4$ . 对于左上角第 1 点, 直接赋值, 利用条件概率  $P(H_2|H_1) =$

$$\frac{P(H_1, H_2)}{P(H_1)} \text{ 确定第一行的高度, 利用条件概率 } P(H_3|H_1) =$$

$$\frac{P(H_1, H_3)}{P(H_1)} \text{ 确定第一列的高度.}$$

## 1.2 天然地形的地形随机生成方法之二: 分形技术

本文采用一种较为简单的分形技术, 即中点插值法, 其方法为: 首先随机确定一方形地域 4 个顶点的高度  $H_{0,0}, H_{0,1}, H_{1,0}$  和  $H_{1,1}$ , 然后计算  $x$  方向两条边中间点的高度, 计算方法<sup>[5]</sup>为: 将每一条边两点高度的平均值加一随机修正值  $H_{rand}$ , 作为该条边的中间点的高度值  $H_{1/2,0}$ , 即

$$H_{1/2,0} = \frac{H_{0,0} + H_{1,0}}{2} + H_{rand}, \quad (4)$$

再计算  $y$  方向两条边中间点的高度  $H_{1,1/2}$ , 方法同上, 最后计算对角线终点的高度, 计算方法为 4 个顶点高度的平均值加一随机修正值, 即

$$H_{1,1/2} = \frac{\sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 H_{i,j}}{4} + H_{rand}, \quad (5)$$

这样一个方形地域被分成 4 个小方形地域, 且每个小方形地域的每一顶点的高度都已确定. 然后对每一小方形地域按上述方法进行分形, 直到满足分辨率要求. 这样既可生成与邻居点相关, 又具有一定随机性的天然地形.

地形的起伏程度可通过给定地形的粗糙度确定. 方法如下:

$$H_{rand} = (rand - 0.5) \frac{rh}{2}, \quad (6)$$

式(6)中,  $rand$  为 0—1 之间的随机数,  $rh$  为给定的粗

糙度,  $i$  为分形的次数.

## 1.3 天然地形的土壤类型、植被类型的确定

地面上的植被和土壤类型有自然生成和人为制造两种类型. 自然生成的土壤和植被类型其形状、大小及分布是随机的, 可利用随机方法生成. 而人为制造的地形形状、大小和分布都是由人决定的, 因此可采用专家参与的方法进行生成, 即指定土壤和植被类型的形状、大小和分布状况. 本文着重讨论随机确定方法.

利用分形方法, 其过程如上所述, 但上述的  $H$  不再表示高度, 而是确定植被类型的一个判别参数, 确定方法举例说明如下: 假设在某一较大的区域内裸露地表占 30%, 草地占 20%, 丛林占 50%, 首先假定  $x_1, x_2$  为类型转变的临界值, 则在  $H < x_1$  的范围内单元定为裸露地表, 在  $x_1 < H < x_2$  的范围内的单元定为草地,  $H > x_2$  范围内的单元为丛林,  $x_1, x_2$  的数值可以通过使  $H < x_1$  范围内的单元数为总数的 30%, 使  $x_1 < H < x_2$  范围内的单元数为总数的 20% 来确定. 土壤类型的确定方法与之相同.

植被类型确定后, 就要进行植被生成, 为了生成满足一定覆盖率的植被, 就必须采用一定的植被生成模型. 对于丛林植被, 可根据植被覆盖率和丛林树冠的平均直径, 换算成某一地域上的树木总数, 然后利用丛林生成模型<sup>[7]</sup>进行生成. 对于低矮植被(如草地), 可认为植被是均匀分布的, 而不必单独进行生成.

## 2 地面的一维温度计算模型

根据红外辐射理论, 地面红外辐射由自身的辐射和反射两部分组成, 对于长波红外辐射, 反射辐射可以忽略不计, 而地面自身的辐射主要取决于地面温度, 地面温度可由一维导热微分方程描述:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (7)$$

式(7)中,  $\rho$  为地面表层土壤组成物质的密度,  $c$  为比热,  $\lambda$  为导热系数,  $T$  为温度,  $z$  为深度坐标. 该方程的下边界条件为: 在某一深度处, 温度为常数. 上边界条件即地面的热平衡方程:

$$E_s + E_c + M_g + H + E_L + G = 0, \quad (8)$$

式(8)中,  $E_s$  为地面单位面积所吸收的太阳短波辐射,  $E_c$  为地面单位面积所吸收的大气长波辐射,  $M_g$  为地面的自身辐射,  $H$  为显热交换,  $E_L$  为潜热交换,  $G$  为地面向下的导热热量. 方程中各项的确定可按两种情况进行, 一是裸露地表, 二是植被型地表.

### 2.1 裸露型地表

对于裸露型地表,  $E_r$  和  $E_s$  可由下面两式确定<sup>[2]</sup>:

$$E_s = (1 - \alpha)E_r \quad (9)$$

$$E_r = \varepsilon\sigma T_a^4(a + b\sqrt{e_a}) \quad (10)$$

其中,  $\alpha$  为地面表面的反射率(短波),  $E_r$  为到达地面处的太阳辐射,  $\varepsilon$  为地面的发射率,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数,  $T_a$  为大气温度,  $e_a$  为大气水汽压,  $a, b$  为经验常数。

显热热量交换由下式计算<sup>[6]</sup>:

$$H = \rho_a C_p C_b u_a (T_a - T_g), \quad (11)$$

潜热热量交换为<sup>[5]</sup>:

$$E_L = \rho_a L C_L u_a (q_a - q_g), \quad (12)$$

式(11)和式(12)中,  $\rho_a$  为空气密度,  $C_p$  为空气定压比热,  $L$  为汽化潜热,  $T_a, q_a$  分别为参考高度处的大气温度和比湿,  $T_g, q_g$  分别为地面表面处的温度和比湿,  $C_L$  为拖曳系数  $C_L = 0.002 + 0.006(z/5000)$ ,  $z$  为海拔高度  $m$ ,  $u_a$  为风速(正常风速加阵风影响  $2m/s$ ), 其中<sup>[1]</sup>:

$$q_g = W_s q_w(T_g) - (1 - W_s) q_a, q_a = q_w(T_a) RH \quad (13)$$

式(13)中  $q_w(T)$  为饱和比湿,  $RH$  为相对湿度,  $W_s$  为地面表层含水量<sup>[1]</sup>。

$$W_s = W_s + \frac{1}{2} \frac{P - E}{\rho_w D_n} z_g, \quad (14)$$

式(14)中  $P$  和  $E$  分别为降水率和地面水蒸发率,  $\rho_w$  为水密度,  $D_n$  为地面水扩散率,  $W_s$  为某一厚度为  $z_g$  的土壤层中湿润度的平均值。

## 2.2 植被型地表

对于植被型地表,其显热热量交换为:

$$H = \rho_a C_p \frac{T_a - T_c}{R_{ac}}, \quad (15)$$

潜热热量交换<sup>[6]</sup>为:

$$E_L = \frac{R_n(1 - \tau)\Delta + \rho_a C_p (e_a - e_c^*)/R_a}{\Delta + \gamma(R_{ac} + R_c)/R_a}, \quad (16)$$

式中,  $\gamma$  为干湿表常数 ( $= 0.066 kPa K^{-1}$ ),  $T_c$  为植被层温度,  $e_a$  为参考高度处的空气水汽压,  $e_c^*$  为平均植被层温度下的空气饱和水汽压,  $R_c$  为植被层气孔阻力, 与植被层叶面指数、叶子含水量及光照有关,  $\Delta$  为空气温度下的饱和水蒸气压力曲线的斜率,  $R_{ac}$  为植被层空气动力学阻力<sup>[4]</sup>,  $R_c$  为植被层上方的净辐射,  $R_n = (1 - \alpha)E_s + (\varepsilon_a - \varepsilon_c)\sigma T_a^4$ ,  $R_a$  为长波辐射和热量传递的等效空气动力学阻力,  $R_n^{-1} = R_{ac}^{-1} + (\rho_a C_p / 4\varepsilon_c \sigma T_a^3)^{-1}$ ,  $\varepsilon_c$  为空气的长波发射率,  $\varepsilon_c$  为植被层的表面发射率。

## 3 天然地形温度图像的生成

天然地形的表面高低不同,地面表面的倾角和朝向也各不相同,并且不同的表面其土壤类型、植被类型等也可能不同,因此不同的表面接受的太阳辐射不尽相同,散失的热量也会不同,因而其表面温度也不相同,利用一维模型来计算必然存在很大的误差,但是如果利用三维温度模型来计算,计算量则相当大,为此本文采用准三维模型计算,即分区域对不同的表面,根据其特点,分别按一维模型计算。

为了简化计算,本文将不同的表面倾角、朝向等表面参数按下列方法进行归纳整理,括号内的数据为计算值,对表中各列数据的每一组合进行计算,如(Q1, Z2, S1, P4, Pz6)。在生成地面红外图像时,首先判断地面单元符合哪一组,然后直接调用该组合的计算结果。

表1 数据分类

Table 1 Classification of the Data

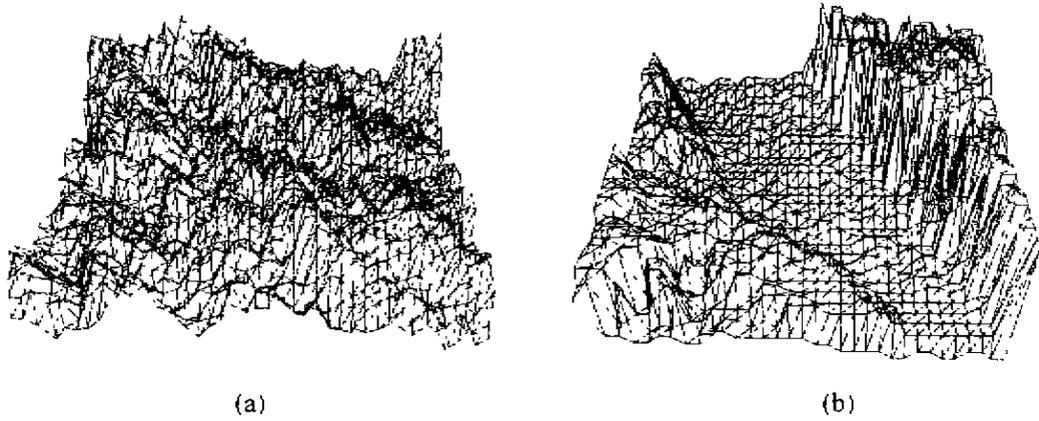
项目	倾角 (Q)/°	方向角 (Z)/°	土壤类型 (S)	植被类型 (P)	植被覆盖率 (Pc)/%
1	0-10(5)	0-30(15)	黄土	小麦	0-5(0)
2	10-20(15)	30-60(45)	黏土	草地	5-15(10)
3	20-30(25)	60-90(75)	沙地	水稻	15-25(20)
4	30-40(35)	90-120(105)	水泥路面	丛林	25-35(30)
5	40-50(45)	120-150(135)	柏油路面		35-45(40)
6	50-60(55)	150-180(165)			45-55(50)
7	60-70(65)	180-210(195)			55-65(60)
8	70-80(75)	210-240(225)			65-75(70)
9	80-90(85)	240-270(255)			75-85(80)
10		270-300(285)			85-95(90)
11		300-330(315)			95-100(100)
12		330-360(345)			

## 4 结果分析

### 4.1 地形生成结果

图1(a)为利用概率统计方法生成的地形,其高度的分布比较有规律,比较接近自然界平坦的粗糙地形,如裸露地表等。图1(b)为分形技术生成的地形,其高度具有更大的随机性,比较接近山地的地形。因此对于不符合正态分布的天然地形,如山脉等,可使用分形技术。对于符合统计规律的粗糙地形,可利用概率统计的方法进行生成。

图2为植被类型确定的结果,黑色为裸露地表,灰色为草地,白色为丛林,在实际的确定过程中,如果某一植被类型的区域面积过于小,则可以用其周围的植被类型代替。



(a) (b)

图1 天然地形生成结果

(a) 概率统计方法 (b) 分形技术

Fig.1 The generation results of natural terrain

(a) statistical method (b) fractal technology

### 4.2 地面红外图像生成结果

图3(a)、(b)和图4(a)、(b)分别为不同时刻的地面温度图像,(a)、(b)的温度图像是在相同的条件下计算出来的,它们的不同在于地形的结构及生成方法不同,其中(a)对应的为图1(a)的用概率统计方法生成的天然地形,(b)对应的为图1(a)的用分形方法生成的天然地形,从图3(a)、(b)中可见,不同的地形构造,其温度图像具有明显的差别,较为亮的像素温度较高,表明其接受的太阳辐射较多,即该面的法线与太阳光线的夹角较小,在知道了太阳的位置后(可根据当地时间确定),即可根据温度图像定性地确定平面地周角及倾角,因此可以利用温度图像进行地形的遥测,另外从图3和图4可见,不同时间的图像的对比度是不同的,比如在中午左右的时间内,朝阳的表面吸收的太阳辐射远大于其它表面,对比度较大,而在傍晚,到达地面

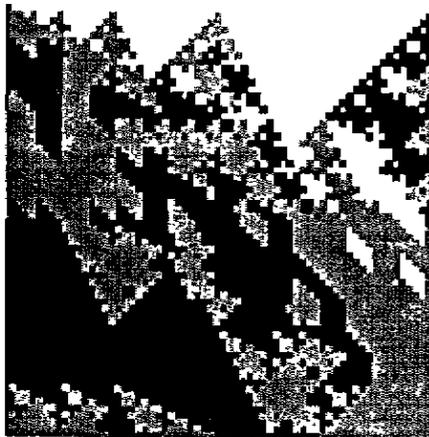
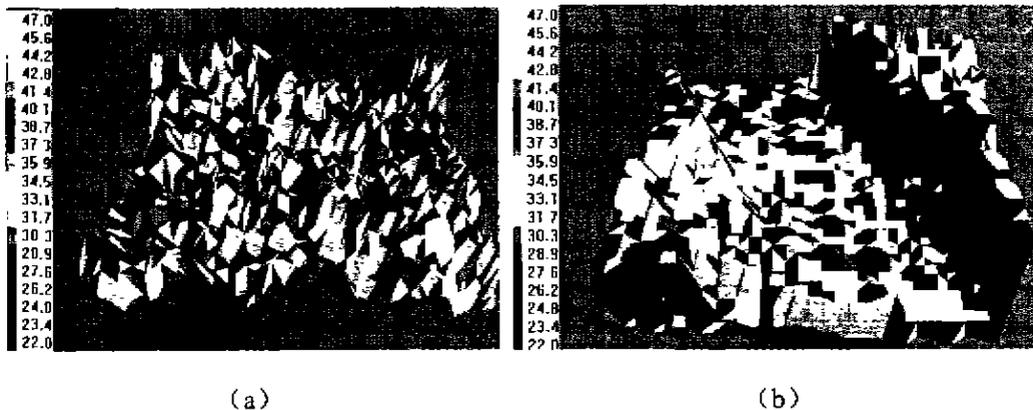


图2 植被类型确定

Fig.2 Determination of vegetation type



(a) (b)

图3 12:30 的温度图像

(a) 概率统计方法 (b) 分形技术

Fig.3 The temperature images at 12:30

(a) statistical method (b) fractal technology

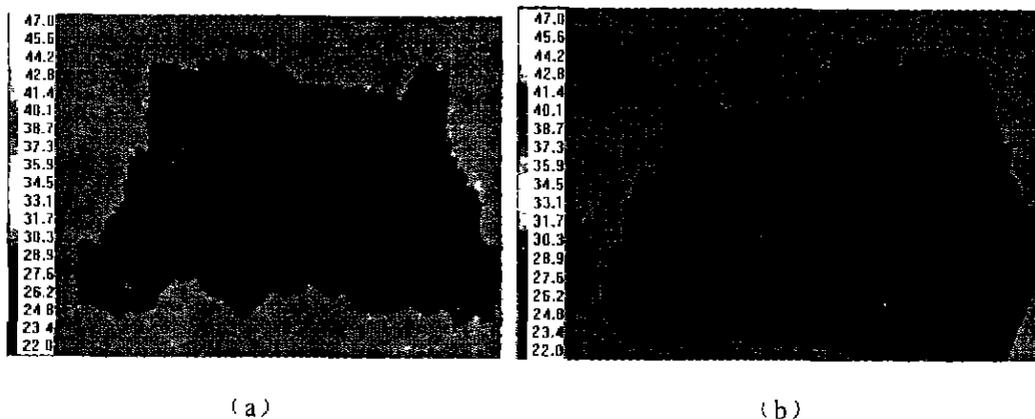


图 4 18:30 的地面温度图像  
(a) 概率统计方法 (b) 分形技术  
Fig. 4 The ground temperature images at 18:30  
(a) statistical method (b) fractal technology

太阳辐射本身已经很弱,朝阳的表面吸收的太阳辐射和其它表面吸收的太阳辐射没有多大的区别,其对比度就较小,而在夜间不同表面间的温度几乎不会有什么差别了,因此利用温度图像遥测地形时,应选择恰当的时间。

## 5 结语

概率统计方法和分形技术均可用于生成天然地形,概率统计方法适合于生成满足高斯分布的天然地形,分形技术适合于生成具有更大随机性的天然地形,如山脉等。

本文建立的地面-三维温度计算模型和天然地形红外辐射理论模型以及图像生成技术,可以生成较为真实的地面温度图像,该图像可以用于天然地形的红外辐射特征分析,并且可用于天然地形地形的红外遥感,另外本文作者还对不同的植被类型和土壤类型进行了计算,结果表明不同的植被类型和土壤类型小的温度图像可以用于植被类型和土壤类型的遥感和遥测。

## REFERENCES

[1] ZHANG Jian-Qi, FANG Xiao-Ping, ZHANG Hai-Xing, et al. Comparative studies of the thermal IR radiation characteristics of different background under natural environ-

- ment, *Journal of Infrared and Millimeter 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
- [2] Kahle A B. A simple thermal model of the earth's surface for geologic mapping by remote sensing, *Journal of Geophysical Research*. 1997,82(11): 1673-1680
- [3] Choudhury B J, Idso S B, Reginato R J. Analysis of a resistance-energy balance method for estimating daily evaporation from wheat plots using One-Time-of-Day infrared temperature observations, *Remote Sensing of Environment*. 1986,19: 253-268
- [4] LUO Zhong, ZHAO Zhong-Ming, ZHU Chong-Guang. A new method for generation of fractal images, *Journal of Remote Sensing*. (罗忠,赵忠明,朱重光,分形图像生成的一种新方法,遥感学报),1998,2(3): 180-185
- [5] Ben-Yosef N, Rahat B, Feign G. Simulation of IR images of natural backgrounds, *Applied Optics*. 1983,22(1): 190-193
- [6] St-vens R T, Watkins C D. *Advanced Image Program in C & C++*, Beijing: Publishing House of Electronic Industry, (C与C++高级图像程序设计,北京:电子工业出版社),1994: 261-273
- [7] HAN Yu-Ge, XUAN Yi-Min, TANG Rui-Feng. Random model and simulation of IR features of forest, *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (韩玉阁,宣益民,汤瑞峰,丛林随机生成模型和丛林红外特征模拟,红外与毫米波学报),1999,18(4): 299-301