

文章编号: 1007-4619(2000)增-0059-05

# 非同温平面混合像元热辐射尺度效应的 模拟验证

苏理宏<sup>1</sup>, 李小文<sup>2,3</sup>, 王锦地<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 北京师范大学 遥感与地理信息系统研究中心, 北京 100875;  
3. 波士顿大学遥感中心, Boston Univ. USA)

**摘要:** 用计算机模拟的方法来讨论遥感像元热红外辐射的尺度效应。模拟主要针对平面非同温像元, 用多变量随机量生成像元内组分不同发射率和温度, 通过比较模拟的热辐射尺度效应与李小文等的 Planck 定律尺度纠正公式, 证明该公式可正确纠正非同温像元的热辐射尺度效应。

**关键词:** Planck 定律尺度效应; 热辐射方向性; 计算机模拟; 模型验证

**中图分类号:** TP701/TP722.5 **文献标识码:** A

## 1 引言

尺度是一个广泛使用的术语, 在不同的领域有着不同的内涵。Lam 和 Quattrochi<sup>[1]</sup>定义了4个与空间现象有关的尺度: (1)制图尺度或地图尺度, 指地图的比例尺, 大比例尺地图提供更详细信息。(2)地理尺度, 即研究区域的空间扩展范围, 大的研究区域具有更大尺度。(3)分辨率, 指空间数据集中最小的可区分部分, 越细的区分单位具有越小的尺度。(4)运行尺度, 指地学现象发生的空间范围, 如森林有比单个树木更大的运行尺度。Goodchild 和 Quattrochi<sup>[2]</sup>从地理学的视角出发讨论了关于尺度的科学应该回答的问题。

在遥感和 GIS 中尺度也受到广泛的关注, 并被认为是从天空观测地球的首要挑战<sup>[3]</sup>。遥感的基本特征之一是其空间分辨率, 即观测的尺度, 像元大小会影响图像特征<sup>[4]</sup>; 像元内组分的异质性会影响植被指数等遥感参数<sup>[5]</sup>, 从而影响基于遥感数据的地学模型。与遥感有关的模型可粗略地分为两类, (1)机理模型, 如植被光学遥感的辐射传输模型和几何光学模型, 是从像元内组分的光学属性、植被组分的统计参数(叶面积指数、叶倾角分布等)

和组分空间分布(植株成丛性及丛分布模式等)来建立像元的反射和辐射特征。(2)应用模型, 是把像元上的遥感信息, 如反射率、反照率等作为输入参数建立应用模型, 如地表辐射平衡模型等, 这时人们通常讨论的尺度是指遥感像元变大后, 在细分辨率上建立的模型是否依然成立。Hall<sup>[6]</sup>给出了检查遥感模型尺度不变的方法, 即粗分辨率的参数对局地参数是线性的, 且模型是线性函数时, 遥感模型是尺度不变的。然而对于异质地表, 这样的关系是很少存在的。李小文等更从物理学原理、定律在遥感像元尺度上适用性的视角出发探讨了 Beer 定律<sup>[7]</sup>、Helmholtz 互易原理<sup>[8]</sup>、Planck 定律的尺度效应<sup>[9]</sup>。Planck 定律描述了绝对黑体辐射出射度随波长的函数, 它的应用要求同温黑体表面。但是遥感像元是由多种异质组分组成, 且组分温度和3维结构往往也是异质的。Becker 和李召良<sup>[10]</sup>, Norman 和 Becker<sup>[11]</sup>都明确涉及像元的尺度效应, 但他们是假设像元组分同温用基尔霍夫定律处理组分多次散射, 得到像元等效发射率。李小文等<sup>[12]</sup>则同时考虑组分间多次散射和温差, 真正得到非同温像元等效发射率。本文模拟首次明确显示温差是影响非同温混合像元热辐射尺度效应的重要因素。

收稿日期: 1999-12-15; 修订日期: 2000-08-10

基金项目: 国家“九·五”攀登预选项(95-预-38), 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077900), 国家自然科学基金49971059, 和美国 NASA NAG5-7217, NAG5-31369 项目。

作者简介: 苏理宏(1965—), 男, 1986年新疆大学数学系毕业。现为中国科学院遥感应用研究所博士生, 主要从事遥感机理方面的研究工作。

## 2 对 Planck 定律用于非同温像元的尺度纠正

遥感模型的尺度效应可分为尺度不变、相似关系和渊源关系 3 种。将 Planck 定律用于非同温混合像元, 我们认为其尺度效应应具有相似关系<sup>[9]</sup>。假设像元由若干同温表面组成, 组分  $j$  的温度为  $T_j$ , 发射率  $\varepsilon_j$ , 局地关系满足 Planck 定律; 像元热辐射与组分热辐射的关系是:

$$L_\lambda = \sum_j a_j \varepsilon_j B_\lambda(T_j) \quad (1)$$

我们首先定义 3 个像元尺度上的关键应用参数。

(1) 平均发射率

$$\bar{\varepsilon} = \sum_j a_j \varepsilon_j \quad (2)$$

(2) 平均温度

$$T_e = \sum_j a_j T_j \quad (3)$$

(3) 发射率加权平均温度

$$T_\varepsilon = \sum_j a_j \varepsilon_j T_j / \bar{\varepsilon} \quad (4)$$

然后给出 Planck 定律对非同温像元的两个尺度纠正因子。

(1) 设定  $T_0 = T_e$ , 对(1)式泰勒展开, 二阶近似为:

$$L = \bar{\varepsilon} \cdot B(T_e) + B'(T_e) \cdot \sum_j a_j \varepsilon_j (T_j - T_e) + \frac{1}{2} B''(T_e) \sum_j a_j \varepsilon_j (T_j - T_e)^2 \quad (5)$$

由于

$$\text{cov}(\varepsilon, T) = \sum_j a_j \varepsilon_j (T_j - T_e) \quad (6)$$

$$\sigma_{T,\varepsilon}^2 = \sum_j a_j \varepsilon_j (T_j - T_e)^2 / \bar{\varepsilon} \quad (7)$$

对  $B'(T)$  和  $B''(T)$  取一阶近似<sup>[9]</sup>, 则有

$$L = f_1(Q) \cdot \bar{\varepsilon} \cdot B(T_e) \quad (8)$$

其中尺度纠正因子为:

$$f_1(Q) = 1 + \frac{D_\lambda}{T_e^2} \cdot \frac{\text{cov}(\varepsilon, T)}{\bar{\varepsilon}} + \frac{D_\lambda}{T_e^3} \left( \frac{D_\lambda}{2T_e} - 1 \right) \sigma_{T,\varepsilon}^2 \quad (9)$$

(2) 设定  $T_0 = T_e$ , 对(1)式泰勒展开, 二阶近似为:

$$L = \bar{\varepsilon} \cdot B(T_e) + \frac{1}{2} B''(T_e) \sum_j a_j \varepsilon_j (T_j - T_e)^2 \quad (10)$$

由于

$$\sigma_{T,\varepsilon}^2 = \sum_j a_j \varepsilon_j (T_j - T_e)^2 / \bar{\varepsilon} \quad (11)$$

则有

$$L = f_2(Q) \cdot \bar{\varepsilon} \cdot B(T_e) \quad (12)$$

其中尺度纠正因子为:

$$f_2(Q) = 1 + \frac{D_\lambda}{T_e^3} \left( \frac{D_\lambda}{2T_e} - 1 \right) \sigma_{T,\varepsilon}^2 \quad (13)$$

由于两个随机变量的协方差是它们的方差和相关系数的函数, 则像元热辐射的尺度纠正要用到 7 个像元尺度上的量:  $\bar{\varepsilon}$ ,  $T_e$ ,  $T_\varepsilon$ ,  $\rho_{\varepsilon,T}$ ,  $\sigma_\varepsilon^2$ ,  $\sigma_T^2$ ,  $\sigma_{T,\varepsilon}^2$ 。为了考察上述两个尺度纠正因子对遥感像元热辐射尺度效应描述的适用性和纠正精度, 我们以计算机模拟为手段, 设计了针对像元尺度上的统计量, 基于非同温像元组分参量的真实像元模拟方法, 进行了模拟试验, 并与尺度纠正因子的模型计算做了对比。

## 3 非同温混合像元热辐射尺度效应模拟方法

### 3.1 物理基础

从遥感的角度, 尺度可以定义为所做观测的空间范围和时间间隔, 遥感的尺度效应更多地是由于观测的行为而产生<sup>[13]</sup>。地面温度的定量遥感受下面几个因素影响:

(1) 像元的大小, 即观测的空间尺度;

(2) 混合像元, 即视场内包括不同质的地物, 地物又有 3 维结构;

(3) 发射率, 对不同的物质, 发射率的波谱变化是相当大的;

(4) 温度变化, 即像元组分可能具有不同温度;

(5) 像元和传感器间的大气;

(6) 传感器本身的性能;

(7) 获取像元辐射亮温时的太阳方向与观测角度;

(8) 解算像元等效温度的热红外辐射模型。

本文以模拟水平非同温混合像元热红外辐射的尺度效应为主, 因此暂时忽略大气的影晌和传感器的性能。垂直视观测并固定波长, 像元热辐射可表达为组分热辐射的加权和:

$$L_{\text{pixel}} = \sum_{j=1}^n a_j \cdot \varepsilon_j \cdot B(T_j) \quad (14)$$

这里  $a_j$ ,  $\varepsilon_j$ ,  $T_j$  分别为像元组分  $j$  在视场内所占的面积份额、组分发射率和组分温度;  $B(T_j)$  是组分温度为  $T_j$  的黑体辐射。

### 3.2 模拟算法

本文的计算机模拟流程是：

(1) 设定像元内组分单元个数  $n$ ；每个单元占  $1/n$  的像元面积，即  $a_j=1/n$ 。

(2) 给定组分温度和组分发射率的均值  $(\varepsilon_0, T_0)$ 、方差  $(\sigma_\varepsilon^2, \sigma_T^2)$  和协方差  $\text{cov}(\varepsilon, T)$ 。

(3) 按(2)给定的均值、方差和协方差和(1)给定的像元单元个数，采用多变元随机量生成算法，得到像元内各单元的组分温度  $T_j$  和组分发射率  $\varepsilon_j$ 。

(4) 计算像元内组分温度和组分发射率的均值、方差和协方差，判断它们是否满足(2)给定的指标，满足则转向(5)，否则转向(3)；

(5) 计算像元内各单元热辐射的加权和

$$L_{\text{pixel}} = \sum_{j=1}^{j=n} \varepsilon_j \cdot B(T_j) / n; \text{ 假定像元等效发射率为}$$

$\bar{\varepsilon}$  ((2)式)，像元参考温度分别为  $T_e$  ((3)式) 和  $T_\varepsilon$  ((4)式)，按下列公式计算该像元热辐射的尺度因子：

$$p_1 = \frac{L_{\text{pixel}}}{\bar{\varepsilon} \cdot B(T_e)} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} \varepsilon_j \cdot B(T_j) / n}{\bar{\varepsilon} \cdot B(T_e)} \quad (15)$$

$$p_2 = \frac{L_{\text{pixel}}}{\bar{\varepsilon} \cdot B(T_\varepsilon)} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} \varepsilon_j \cdot B(T_j) / n}{\bar{\varepsilon} \cdot B(T_\varepsilon)} \quad (16)$$

(6) 按(9)式和(13)式计算 Planck 定律尺度纠正因子  $f_1$  和  $f_2$ ，与(5)计算的尺度因子  $p_1$  和  $p_2$  对比。

### 3.2 多变元随机量生成

模拟中需要生成满足多变元分布的随机量，但大多数的随机量生成算法都仅考虑单变元分布，这里给出一个正态多变元分布随机量生成算法<sup>[14]</sup>。若行向量  $X'=(X_1, \dots, X_n)$  服从多变元正态分布  $(X \sim N(\mu, V))$ ，则它的概率密度函数是

$$f_X(x) = (2\pi)^{-n/2} |V|^{-1/2} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x-\mu)'V^{-1}(x-\mu)\right\} \quad (17)$$

这里方差-协方差矩阵  $V$  是任意正定对称矩阵。考虑转换  $X = cZ + \mu$ ， $c$  是满足  $cc' = V$  的唯一下三角矩阵。 $Z$  的  $n$  个组分是服从  $N(0,1)$  的独立随机变量。使用 Cholesky 分解得到矩阵  $c$ ，该方法使得  $c$  的元素可以递归得到

$$c_{ii} = \sqrt{V_{ii} - \sum_{m=1}^{i-1} c_{im}^2} \quad (18)$$

$$c_{ji} = \left\{ V_{ij} - \sum_{m=1}^{i-1} c_{im}c_{jm} \right\} / c_{ii} \quad (j > i), \quad i = 1, \dots, n \quad (19)$$

该算法易于实现且运行速度快。

## 4 热辐射尺度效应模拟试验

我们以平面非同温混合像元做了 3 组模拟试验。

(1) 固定像元组分温度和组分发射率均值和标准差，给出 5 种组分温度和组分发射率间的相关关系，模拟检验组分温度和发射率的相关性对非同温混合像元热辐射尺度效应的贡献。根据 1998 年 Snyder 测量的多种典型地物波谱发射率<sup>[15]</sup>，我们假设自然地物发射率的均值为 0.97，标准差 0.02；均值温度为 300K，标准差 15K。发射率和温度的相关系数分别取为 +1.0, +0.5, 0.0, -0.5, -1.0。表 1 列出模拟结果与计算结果的对比。

(2) 固定组分发射率均值；给出发射率标准差 0.04 和 0.02，组分温度取 300K 和 320K，温度标准差 20K 和 50K，发射率和温度的相关系数取 +1.0 和 -1.0，来模拟检验组分发射率和组分温度的标准差对非同温混合像元热辐射尺度效应的贡献。并与(1)对比来检验组分发射率和组分温度的均值对热辐射尺度效应的影响。表 2 列出模拟结果与计算结果的对比。

(3) 假设像元由两种不同质的组分组成，每种组分都有特定发射率和温度均值、标准差和其相关系数，但两种组分间不具相关性；以此来模拟由植物和土壤构成的混合像元的热辐射尺度效应。参考 Snyder 的测量<sup>[15]</sup>，假设组分 1 的发射率均值为 0.90，标准差 0.02；温度均值为 295K，标准差 7K；组分 2 的发射率均值为 0.96，标准差 0.02；温度均值为 305K，标准差 7K。各组分的发射率和温度相关系数分别取 +1.0 和 -1.0，但不设定组分间的相关性。这样有 4 种组合，表 3 的第 5 行是两组分的相关系数都设为 0 的情况。表 3 列出模拟结果与计算结果的对比。

从这 3 张表可以看出，针对像元尺度上不同统计参数的设定，两个尺度纠正因子的计算机模拟结果与模型计算结果的吻合均很好，即  $p_1$  与  $f_1$ ， $p_2$  与  $f_2$  总是很接近。两个尺度纠正因子间的比较显示  $f_2$  比  $f_1$  更稳定， $f_2$  几乎不受组分发射率和温度相关性的影响。总体上看组分发射率和组分温度的均值，方差，发射率和温度相关性对非同温混合像元

表1 组分温度和发射率具有不同相关性的热辐射尺度效应

Table 1 Thermal emission scale effect for component temperature and emissivity with various correlation

$\bar{\epsilon}$	尺度纠正因子1					<i>corr</i>	尺度纠正因子2			
	$T_e$	$\sigma(T_e)$	$p_1$	$f_1$	$T_e$		$\sigma(T_e)$	$p_2$	$f_2$	
0.968	298.8	15.0	1.023	1.022	+0.98	299.1	15.0	1.018	1.017	
0.969	300.0	15.1	1.020	1.019	+0.50	300.1	15.1	1.017	1.017	
0.969	300.2	15.0	1.017	1.017	0.00	300.2	15.0	1.017	1.017	
0.969	300.2	14.9	1.015	1.014	-0.49	300.0	14.9	1.017	1.017	
0.969	300.5	15.0	1.012	1.012	-0.98	300.2	15.0	1.017	1.017	

表2 组分不同发射率和温度条件下尺度纠正因子模拟与计算对比

Table 2 Comparison of simulated and computed scale factor for various component emissivities and temperatures

$\bar{\epsilon}$	$\sigma(\epsilon)$	尺度纠正因子1					<i>corr</i>	尺度纠正因子2			
		$T_e$	$\sigma(T_e)$	$p_1$	$f_1$	$T_e$		$\sigma(T_e)$	$p_2$	$f_2$	
0.900	0.04	300.1	20.1	1.045	1.044	+0.99	301.0	20.1	1.031	1.030	
0.899	0.04	300.6	19.9	1.016	1.015	-0.99	299.7	19.9	1.031	1.030	
0.900	0.04	300.3	50.4	1.225	1.223	+0.98	302.5	50.3	1.183	1.181	
0.900	0.04	300.3	49.9	1.150	1.149	-0.99	298.1	49.8	1.191	1.191	
0.900	0.02	300.4	20.0	1.038	1.037	+0.99	300.8	20.0	1.030	1.029	
0.899	0.02	300.8	20.0	1.023	1.022	-0.99	300.4	19.9	1.030	1.029	
0.900	0.02	300.9	50.0	1.203	1.201	+0.99	302.0	50.0	1.182	1.181	
0.899	0.02	301.5	49.9	1.164	1.164	-0.99	300.4	49.9	1.184	1.184	
0.900	0.02	320.4	20.0	1.029	1.028	+0.99	320.8	20.0	1.023	1.022	
0.899	0.02	320.8	20.0	1.016	1.015	-0.99	320.4	19.9	1.023	1.022	
0.960	0.02	299.8	20.0	1.037	1.036	+0.99	300.2	20.0	1.031	1.030	
0.960	0.02	300.4	20.0	1.024	1.023	-0.99	300.0	20.0	1.031	1.030	

表3 模拟2类组分像元热辐射尺度效应对比

Table 3 Comparison of thermal emission scale effect for 2 kind components

$\bar{\epsilon}$	$\sigma(\epsilon)$	尺度纠正因子1					<i>corr</i>	尺度纠正因子2			
		$T_e$	$\sigma(T_e)$	$p_1$	$f_1$	$T_e$		$\sigma(T_e)$	$p_2$	$f_2$	
0.930	0.037	300.1	8.7	1.010	1.010	+0.83	300.4	8.7	1.006	1.006	
0.929	0.037	299.9	8.5	1.008	1.008	+0.48	300.0	8.5	1.006	1.005	
0.930	0.036	299.8	8.5	1.008	1.008	-0.47	300.0	8.5	1.006	1.005	
0.928	0.036	300.2	8.5	1.008	1.008	-0.46	300.3	8.5	1.006	1.005	
0.929	0.036	300.4	8.6	1.006	1.006	+0.15	300.5	8.6	1.006	1.005	

的尺度效应均有显著贡献。所以对遥感像元而言,在将 Planck 定律应用于地温遥感时,尺度纠正必须考虑的。

## 5 结论

本文非同温像元的计算机模拟显示,异质像元热红外辐射存在明显的尺度效应, Planck 定律不能

不加纠正地用于对地遥感;李小文等的尺度纠正公式能较好地纠正异质像元热红外辐射的尺度效应。

## 参考文献 (References)

- [1] Lam, N., Quattrochi, D.A. On the issues of scale, resolution, and fractal analysis in the mapping sciences[J]. *Prof. Geogr.*, 1992, 44:88-98.

- [2] M.F. Goodchild, D.A. Quattrochi. Scale, Multiscaling, Remote Sensing, and GIS[M]. *Scale in Remote Sensing and GIS*, 1997, 1—11, Quattrochi, D.A and Goodchild, M.F., eds., CRC Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- [3] M.Raffy. Heterogeneity and change of scale in models of remote sensing: Spatialization of multi-spectral models[J]. *INT.J.Remote Sensing*, 1994, 15(12): 2359—2380
- [4] Cutis E.Woodcock, Alan H.Strahler. The factor of scale in remote sensing[J]. *Remote Sens. Environ*, 1987, 21:311—332.
- [5] M.A.Friedl, F.W.Davis, J.Michaelsen, M.A.Moritz. Scaling and uncertainty in the relationship between the NDVI and land surface biophysical variables: An analysis using a scene simulation model and data from FIFE[J]. *Remote Sens. Environ.*, 1995, 54:233—246.
- [6] Hall,F.G., Huemmrich,K.F., Goetz,S.J., Sellers,P.J., Nickelson,J.E. Satellite remote sensing of surface energy balance: success, failures, and unsolved idles in FIFE[J]. *JGR*, 1992, 97:19061—19089.
- [7] Li,X., A.Strahler. Gap frequency in discontinues canopies[J]. *IEEE Trans. On Geoscience and Remote sensing*, 1988, 26(2):161—170.
- [8] Li. X., J.Wang, A. Strahler. Apparent reciprocity failure in directional reflectance of structured surface[J]. *Progress in natural science*, 1999, 8(4):456—460.
- [9] Li Xiaowen, Wang Jindi, A.H.Strahler. Scale effect of Planck law for non-isothermal blackbody surface[J]. *Science in China(E)*, 1999, 29(5):422—426. [李小文,王锦地, A.H.Strahler. 非同温黑体表面 Planck 定律的尺度效应[J]. 中国科学(E), 1999, 29(5):422—426.]
- [10] Becker F., Li Z. Surface temperature and emissivity at various scales: Definition, measurement and related problems[J]. *Remote Sensing Review*, 1995, 12: 225—253.
- [11] Norman J., Becker F. Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surface[J]. *Remote Sensing Review*, 1995, 12: 159—173.
- [12] Li. X., A.Strahler, M.Friedl. A conceptual model for effective directional emissivity from non-isothermal surface[J]. *IEEE Trans. On Geoscience and Remote sensing*, 1999, 37(5):2508—2517.
- [13] Dale A. Quattrochi. Spatial and temporal scaling of thermal infrared remote sensing data[J]. *Remote Sense Reviews*, 1995, 12: 255—286.
- [14] John Dagpunar. Principles of random variate generation[M]. Clarendon press Oxford, 1988.
- [15] W.C.Snyder, Z.Wan, Y.Zhang, Y.Z.Feng. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space[J]. *INT.J.Remote Sensing*, 1998, 19(14): 2753—2774.

## Simulation for Thermal Emission Scale Effect of Plane Non-Isothermal Surfaces

SU Li-hong<sup>1</sup>, LI Xiao-wen<sup>2,3</sup>, WANG Jin-di<sup>2</sup>

(1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Research Center of Remote Sensing and GIS, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Department of Geography and Center for Remote Sensing, Boston University, Boston, MA 02215, USA)

**Abstract:** In this paper we simulated thermal emission scale effect of plane non-isothermal surfaces, and validated Li-Wang-Strahler's scale-corrected Planck law for non-isothermal surfaces. We used multivariate normal distribution to generate component emissivity and component temperature under given the mean, variance and covariance of component emissivity and temperature. Given pixel temperature, two scale-corrected factors could be calculated. Comparing simulated scale-corrected factors with Li-Wang-Strahler's scale-corrected factors, we found the simulated ones always was close to the deduced. The simulation showed that Li-Wang-Strahler's model correctly redressed scale effect of non-isothermal surfaces.

**Key words:** scale effect; directional emissivity; computer simulation; model validation