

文章编号: 1007-4619 (2003) 01-0001-07

# 两组分非同温像元热辐射中多次散射影响的解析模型和验证

王锦地<sup>1</sup>, 李小文<sup>1,2</sup>, 苏红波<sup>3</sup>, 焦子铨<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学资源与环境科学系, 遥感与GIS研究中心, 北京 100875; 2. 美国波士顿大学地理系, 遥感中心, 波士顿 MA 02215; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 具有三维结构的非同温地表像元表面热辐射的方向性, 取决于像元组分参数, 如组分温度、组分发射率、组分结构参数等; 而组分的热辐射在组分间的多次散射对像元表面总热辐射方向性的贡献主要取决于像元的几何结构。本文以热辐射几何光学模型为基础, 根据多次反弹的原理定量表述了组分热辐射在组分间的多次散射, 对随机分布的两组分非同温像元, 建立了解析表达的热辐射方向性模型。室内模拟实验实测数据的检验证明了模型的适用性和简单性。

**关键词:** 非同温像元; 热辐射方向性; 几何光学模型; 多次散射

**中图分类号:** TP701 **文献标识码:** A

## 1 引言

地表像元热辐射的方向性是当前热红外遥感基础研究中的热点问题。当地表像元由多种非同温组分构成时, 如何定量描述像元的三维结构与像元热辐射是建立像元尺度上热辐射遥感物理模型的关键。李小文-Strahler-Friedl 概念模型(简称 LSF 模型)基于简单的几何光学原理, 建立了非同温像元热辐射方向性的几何光学模型<sup>[1]</sup>, 明确地将非同温像元的有效发射率表示为基于像元平均温度的等效同温像元的  $\epsilon_{BRDF}$  与由组分温差分布导致的视在发射率增量  $\Delta\epsilon_{go}$  之和。其中  $\epsilon_{BRDF}$  由等效同温表面的二向性反射分布函数(BRDF)从基尔霍夫定律导出, 包括了像元内多次散射的影响。

几何光学模型的优势, 在于它基于阳光照射到三维结构物体在地面投射阴影这一基本事实, 依据几何光学的原理, 将像元的结构特征参数与像元表面的反射或热辐射的关系简单明晰地表达出来<sup>[1,2]</sup>, 而像元结构参数是独立于光谱波段的, 因此几何光学模型的基本原理并不仅仅适用于可见光、近红外遥感波段。

在处理热红外辐射方向性观测数据时, 我们曾从简单的离散组分分布像元结构的情况出发, 暂时忽略组分间的多次散射对像元总辐射的贡献, 用组分面积比加权的几何光学方法, 同时考虑非同温组分的方向辐射和环境辐射的影响, 建立了简单的像元热辐射方向性模型。在用实验观测数据对该模型成功地进行了验证以后, 将模型应用于象元组分温度的反演方法研究<sup>[3]</sup>。本文的工作在此基础上, 依据不同像元结构的室内模拟实验数据, 进一步针对像元内多次散射的影响, 建立像元尺度上的解析模型, 是对原简单模型的进一步完善。对水平均匀植被像元和计算机模拟的 V 型谷像元内多次散射的影响, 已有过一些研究结果发表<sup>[4,5]</sup>, 本工作主要研究完成的, 是针对常见几何体组分随机分布的像元, 建立多次散射影响的解析模型, 因而使模型更具实用价值。

## 2 组分随机分布的非同温像元热辐射几何光学模型

在热红外辐射方向性模型和模型反演的研究中, 我们曾采用张仁华教授小组的室内模拟观测数

收稿日期: 2001-06-25; 修订日期: 2001-09-17

基金项目: 国家攀登预选项目(95-预-38)、国家重点基础研究发展规划项目(G20000779)、高等学校骨干教师资助计划项目。

作者简介: 王锦地(1955—), 女, 教授, 1982年毕业于北京邮电学院无线电技术专业, 现主要从事遥感基础理论和遥感实验的科研与教学工作, 已发表第一作者论文 17 篇。

据<sup>[6]</sup>进行模拟验证。该观测数据集中包括了对三种不同非同温模拟目标的热辐射方向性观测结果。观测目标由将给定数量的规则几何体按随机分布放置在黑板背景上构成,其中一种几何体是用尼龙制作的小圆锥体,观测像元内几何体组分的垂直覆盖度约为 10%,方向覆盖度在观察方向  $\theta_v=40^\circ$  时达到最大值,约为 14%。这种情况下,忽略锥体组分间的多次散射对像元总方向辐射的计算影响不大。用数据验证的结果表明未考虑多次散射的简单模型和考虑了多次散射的 LSF 模型均与观测数据吻合很好,对多次散射的贡献的忽略是基本合理的<sup>[3,6]</sup>。

观测目标中的另外两种几何体分别为乒乓球和模拟棉花树<sup>[6]</sup>,两种几何体的空间体积都较圆锥体大。这样对乒乓球几何体而言,将若干几何体放在黑板背景上以后,观测像元内几何体组分的垂直覆盖度要大于 30%,在  $\theta_v=40^\circ$  时约为 40%,因此像元内的多次散射对像元总辐射的贡献就不能忽略,而贡献量主要受像元开放度<sup>[2]</sup>的影响。

## 2.1 组分随机分布的像元结构与开放度

观测目标的像元结构,可以用几何光学模型来描述<sup>[7]</sup>。以乒乓球几何体组分构成的像元为例,设球的半径为  $R$ ,在视场(像元)  $A$  中放置球体的总数为  $n$ ,球体在视场中二维空间的放置点随机分布,球体在视场中的放置密度  $\lambda=n/A$ 。若给定观察方向的天顶角  $\theta_v$ ,在视场中任意一点能够观察到背景组分的概率为:

$$a_1(\theta_v) = e^{-\lambda\pi R^2 \sec^2 \theta_v} \quad (1)$$

在视场中可观察到球体组分的概率为:

$$a_2(\theta_v) = 1 - e^{-\lambda\pi R^2 \sec^2 \theta_v} = 1 - a_1(\theta_v) \quad (2)$$

注意到这里  $a_1(\theta_v)$  和  $a_2(\theta_v)$  均为观察方向  $\theta_v$  的函数,  $a_1(\theta_v)$  亦可称为像元的方向间隙率。

李小文等曾定义离散冠层的开放度  $K_{\text{open}}(h)$ ,其中  $h$  为冠层内给定水平面的高度<sup>[8]</sup>。王锦地等曾在树冠结构参数已知的情况下,计算了树冠层中不同空间位置( $r, h$ )对天空散射辐射入照的开放度  $K_{\text{open}}(r, h)$ ,其中给定点( $r, h$ )距树中心的距离为  $r$  和距地面的高度为  $h$ ,开放度的计算主要取决于给定点( $r, h$ )在上半球各观察方向上的方向间隙率,它是树冠结构参数的函数<sup>[9]</sup>。因此,在已知目标像元结构的情况下,相应的像元组开放度可以根据组分方向间隙率的半球积分计算得到。为简化模型,本文采用组分的半球开放度作为组分的平均开

放度,而不考虑组分内部的三维分布造成的非均一开放度的影响。

## 2.2 两组分像元热辐射方向性的 LSF 模型

在描述离散组分分布的非同温像元热辐射方向性时,我们曾采用简单模型将像元总的方向性辐射,表达为像元组分面积比加权的形式:

$$L_\lambda(v) = a_1(v) \epsilon_1(v) B_\lambda(T_1) + a_2(v) \epsilon_2(v) B_\lambda(T_2) + (1 - (a_1(v) \epsilon_1(v) + a_2(v) \epsilon_2(v))) L_{\text{em}} \quad (3)$$

其中  $(a_1(v) \epsilon_1(v) + a_2(v) \epsilon_2(v))$  相当于 LSF 模型中忽略组分间多次散射影响情况下的  $\epsilon_{\text{BRDF}}(v)$ 。从实验条件出发,模型考虑了环境辐射的影响<sup>[3]</sup>。

当像元内组分的分布复杂使得多次散射的影响不可忽略时,描述组分间多次散射影响的原则有二,其一是将多次散射的影响明确表示为像元结构参数的函数,即其影响程度是随着像元结构的不同而变化的。其二是尽量保持模型的简单形式。

为简化问题,假设组分 1 为像元的背景组分,背景表面均一,在像元中所占的面积比为  $a_1$ ,表面温度为  $T_1$ ,组分发射率为  $\epsilon_1$ ,半球反射率为  $r_1$ 。当考虑组分 1 参数的方向性时,则可有方向发射率  $\epsilon_1(v)$ ,方向面积比  $a_1(v)$ 。设像元内随机放置在背景组分 1 上的几何体为组分 2,模拟具有固定结构参数的植被冠层组分,组分平均面积比为  $a_2$ ,组分温度  $T_2$ ,组分材料发射率为  $\epsilon_2$ ,半球反射率为  $r_2$ ,组分方向性面积比  $a_2(v) = 1 - a_1(v)$ 。

由 LSF 概念模型,非同温像元的有效发射率可以表示为:

$$\epsilon_0(v) = \epsilon_{\text{BRDF}}(v) + \Delta \epsilon_{\text{G0}}(v, T_1, T_2, T_0) \quad (4)$$

这里  $T_0$  为像元的参考温度或像元的平均温度,  $T_0$  计算式可参见文献<sup>[3]</sup>。则  $\Delta \epsilon_{\text{G0}}$  可以根据 LSF 模型计算<sup>[1]</sup>。注意这里的计算忽略了由组分温差导致的像元有效发射率的视在增量中的多次散射的影响,此部分的影响量极小,这种忽略的合理性已得到过证明<sup>[5]</sup>。

当组分 2 的面积比相对很小时,例如小于 10%,并且组分 1 即背景组分接近黑体,则忽略像元内组分的多次散射,就有:

$$\epsilon_{\text{BRDF}}(v) = a_1(v) \epsilon_1(v) + a_2(v) \epsilon_2(v) \quad (5)$$

我们就这种情况对模型(4)式进行过验证<sup>[3]</sup>

对于更一般的情况,当像元内组分间的多次散射不能被忽略时,式(5)要修正为:

$$\varepsilon_{BRDF}(v) = a_1(v) \varepsilon_1(v) + a_2(v) \varepsilon_2(v) + \varepsilon_{ms} \quad (6)$$

根据 LSF 模型,  $\varepsilon_{ms}$  定义为在给定观察方向  $v$  像元总辐射中的多次散射对同温等效发射率的贡献。以下采用像元组分温度和组分参数来解析表达这部分贡献。

### 2.3 组分随机分布像元中多次散射影响的解析模型

组分随机分布像元内的多次散射对像元总辐射的影响,可以分为两个部分来讨论。

(1) 源于背景组分即组分 1 的辐射在给定方向  $v$  的逸出

组分 1 的半球向热辐射为:

$$M_1^{(1)} = \pi a_1 \varepsilon_1 B(T_1) \quad (7)$$

式中  $M_1^{(1)}$  的单位为  $W/m^2$ 。式中有因子  $\pi$  是因为我们在  $B(T_1)$  计算时采用的 Planck 常数已除过  $\pi$  而使  $B(T_1)$  成为方向亮温。

在给定的观察方向  $v$ , 从组分 1 的直接逸出辐射为:

$$a_1(v) \varepsilon_1(v) B(T_1) \quad (W/m^2 sr)$$

组分 1 的热辐射  $M_1^{(1)}$  中的一部分直接逸出冠层,另一部分会被组分 2 遮挡。设组分 1 对上半球空间的开放度为  $K_{open1}$ ,  $K_{open1}$  可以根据式(1)(2)给出的组分方向间隙率计算。组分 1 的热辐射到达组分 2 的部分为:

$$M_1^{(1)2} = M_1^{(1)} \cdot (1 - K_{open1}) \quad (8)$$

这部分被组分 2 反射后为:  $M_1^{(1)2} * r_2$ , 这里  $r_2 = 1 - \varepsilon_2$  为组分 2 的半球反射率。

经组分 2 反射的辐射有一部分会直接逸出像元,另一部分会再次返回到组分 1。

其中,再次返回到组分 1 的部分取决于组分 1 对组分 2 的观察系数  $VF_{1-2}$ ,  $VF_{1-2}$  同样取决于像元结构参数。如果组分 2 的开放度为  $K_{open2}$ , 则  $VF_{1-2} = 1 - K_{open2}$ ,  $K_{open2}$  可以用计算  $K_{open1}$  类似的方法得到。注意这里假定随机分布的组分 2 的密度不很大,组分 2 内部各几何体之间的多次散射可以忽略。当此部分不能忽略时,组分 2 内部的观察系数为  $VF_{2-2}$ , 则有:  $K_{open2} + VF_{1-2} + VF_{2-2} = 1$ 。

则到达组分 1 的部分为  $M_1^{(1)}(1 - K_{open1}) * r_2 * VF_{1-2}$ , 它再次被组分 1 反射,即经过 2 次反弹以后逸出组分 1 的辐射为:

$$M_1^{(2)} = M_1^{(1)}(1 - K_{open1}) * r_2 * VF_{1-2} \quad (9)$$

进一步的反射和逸出就可以根据多次反弹模型<sup>[10]</sup>的原理来计算。采用这种分析方法推导得到,

经过每一次散射以后的逸出辐射可以表示为一个几何级数,其公比为  $q = (1 - K_{open1})VF_{1-2}r_2 * r_1$ 。将这些多次散射后的所有逸出辐射求和,就得到源于组分 1 的发射并从组分 1 逸出的总辐射为:

$$\begin{aligned} M_1 &= M_1^{(1)} + M_1^{(2)} + \dots = M_1^{(1)} / (1 - q) \\ &= M_1^{(1)} + M_1^{(1)} q / (1 - q) \end{aligned} \quad (10)$$

这里采用

$$M_{S1.1} = M_1^{(1)} q / (1 - q) \quad (11)$$

来表示其中多次散射的贡献。

类似的,源于组分 1 的发射并最终从组分 2 逸出的部分为:

$$M_{S1.2} = M_1^{(1)}(1 - K_{open1})r_2 / (1 - q) \quad (12)$$

(2) 源于几何体组分即组分 2 的逸出辐射

组分 2 的半球向热辐射为:

$$M_2^{(1)} = \pi a_2 \varepsilon_2 B(T_2) \quad (W/m^2) \quad (13)$$

在给定的观察方向  $v$ , 从组分 2 的热辐射直接逸出的亮温为

$$a_2(v) \varepsilon_2(v) B(T_2) \quad (W/m^2 sr)$$

相应的组分间的多次散射对像元总辐射的贡献包括:a)几何体组分和背景组分之间的多次散射, b)几何体之间即组分 2 内部的多次散射,当  $VF_{2-2}$  很小,即当实验设置中组分 2 的几何体之间的观察系数相对很小时,这一部分的贡献可以忽略。

对于 a), 因为组分 2 对组分 1 的观察系数  $VF_{2-1} = 1 - K_{open1}$ , 表示组分间每次散射后的逸出辐射所形成的几何级数的公比仍为  $q$ 。我们可以仿以上的推导,直接给出源于组分 2 的辐射而从组分 1 逸出的部分为:

$$M_{S2.1} = M_2^{(1)} VF_{1-2} r_1 / (1 - q) \quad (14)$$

和源于组分 2 的发射从组分 2 逸出的部分为:

$$M_{S2.2} = M_2^{(1)} q / (1 - q) \quad (15)$$

由式(11)和(14),从组分 1 逸出的多次散射总的为:

$$\begin{aligned} M_{S1} &= M_{S1.1} + M_{S2.1} = [M_1^{(1)} q \\ &+ M_2^{(1)} VF_{1-2} r_1] / (1 - q) \end{aligned} \quad (16)$$

因为这里基于多次散射是各向同性的,且有空间均一的组分面积比  $a_1$ , 所以其对  $\varepsilon_{ms}$  的贡献为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ms1} &= a_1(v) [\varepsilon_1 B(T_1) q + \varepsilon_2 (a_2 / a_1) B(T_2) \\ &\times VF_{1-2} r_1] / (1 - q) B(T_0) \end{aligned} \quad (17)$$

类似地,由式(12)和(15),可以得到从组分 2 逸出的多次散射为:

$$\begin{aligned} M_{S2} &= M_{S1.2} + M_{S2.2} = [M_1^{(1)}(1 - K_{open1})r_2 \\ &+ M_2^{(1)} q] / (1 - q) \end{aligned} \quad (18)$$

且:

$$\epsilon_{ms2} = a_2(v) [\epsilon_1(v) (a_1/a_2) B(T_1) (1 - K_{open1}) r_2 + \epsilon_2 B(T_2) q] / (1 - q) B(T_0) \quad (19)$$

由式(17)和(19),式(6)中多次散射  $\epsilon_{ms}$  影响的解析模型表达式为:

$$\epsilon_{ms} = \epsilon_{ms1} + \epsilon_{ms2} \quad (20)$$

### 3 采用室内模拟实验观测数据的模型验证

室内模拟实验的基本情况如前节所述,我们采用实验数据进行了模型计算,并与实测的模拟两组分非同温像元方向性热辐射进行了比较。像元尺度上辐射温度的模型计算基于式(3)(4)(6)。将组分参数作为模型的输入,对两种不同几何体组分构成像元的模型计算结果  $T_v$  和观测数据  $T_{meas}$  的比较如下,在模型计算中明确给出了多次散射对像元有效比辐射率的贡献,并讨论了其方向性与像元结构的关系。

### 3.1 不同几何体组分构成像元的模型验证

实验中,模拟像元由背景组分和几何体组分两种组分构成,背景组分为恒温黑板,几何体组分又有椭球形和球形两种。从对背景组分(组分1)的方向辐射温度观测数据,可以推出组分1的平均发射率  $\epsilon_1$  和观察方向天顶角  $\theta_v$  从0度到45度变化过程的方向发射率  $\epsilon_1(v)$  [3]。

实验中采用棉花制作、用于模拟椭球形树冠的几何体构成组分2的像元,是最接近于真实非同温像元的模拟。实验中观测到的组分参数有:组分1的温度  $T_1 = 323.15\text{K}$ , 平均发射率  $\epsilon_1 = 0.974$ ; 组分2的温度  $T_2 = 305.84\text{K}$ , 平均发射率  $\epsilon_2 = 0.87$ ; 环境辐射温度  $T_{env} = 289.15\text{K}$ ; 沿用参考文献[3]的方法计算得到的像元平均温度  $T_0 = 317.739\text{K}$ 。按 GOMS 几何光学模型[7]计算得到的组分1的方向性面积比  $a_1(v)$ , 开放度  $K_{open1} = 0.6473$ 。考虑多次散射的热辐射方向性模型的计算结果和观测数据的比较列在表1, 示于图1。

表 1 椭球形几何体像元组分的模型验证

Table 1 Calculation result and measurement data on ellipsoidal samples

$\theta_v$	$a_1(v)$	$\epsilon_{BRDF}$	$\epsilon_{ms}$	$\epsilon_{GO}$	$\epsilon_0$	$T_v$	$T_{meas}$
0	0.905	0.9905	0.0159	0.0435	1.0341	319.251	318.740
4	0.904	0.9905	0.0161	0.0433	1.0338	319.221	318.740
8	0.899	0.9903	0.0167	0.0424	1.0326	319.124	318.680
12	0.891	0.9891	0.0176	0.0409	1.0300	318.947	318.590
16	0.881	0.9879	0.0189	0.0391	1.0270	318.726	318.430
20	0.869	0.9856	0.0204	0.0367	1.0223	318.431	318.230
24	0.855	0.9831	0.0222	0.0341	1.0171	318.094	317.950
28	0.839	0.9795	0.0242	0.0310	1.0105	317.691	317.690
32	0.821	0.9743	0.0264	0.0275	1.0018	317.207	317.290
36	0.801	0.9687	0.0289	0.0236	0.9923	316.669	316.940
40	0.779	0.9612	0.0316	0.0193	0.9805	316.034	316.400

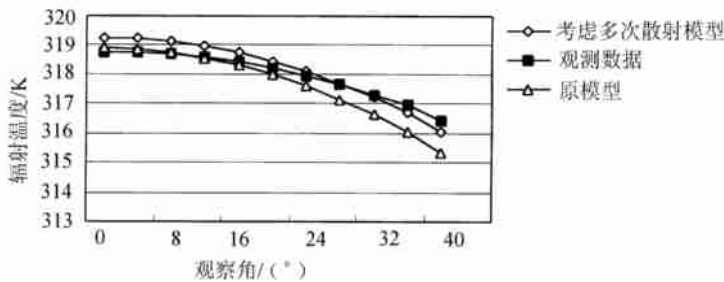


图 1 椭球形几何体模拟观测像元的模型计算结果和观测数据的比较

Fig. 1 Model prediction and measurement data on cotton tree samples

对由乒乓球几何体构成组分 2 的像元,观测到的环境辐射温度和组分 1 的参数同前,组分 2 的温度  $T_2=308.87$ ,平均发射率  $\epsilon_2=0.946$ ;计算得到的像元平均温度  $T_0=316.117\text{K}$ 。按几何光学模型计

算得到的组分 1 的方向性面积比  $a_1(v)$ ,开放度  $K_{\text{open1}}=0.4764$ 。考虑多次散射的热辐射方向性模型的计算结果和观测数据的比较列在表 2,示于图 2。

表 2 球形几何体模拟观测像元的模型计算结果和观测数据的比较

Table 2 Calculation result and measurement data on spherical samples

$\theta_v$	$a_1(v)$	$\epsilon_{BRDF}$	$\epsilon_{ms}$	$\epsilon_{GO}$	$\epsilon_0$	$T_v$	$T_{meas}$
0	0.672	0.9902	0.0175	0.0276	1.0177	315.572	315.220
4	0.672	0.9901	0.0175	0.0275	1.0176	315.561	315.220
8	0.670	0.9898	0.0176	0.0271	1.0170	315.520	315.180
12	0.666	0.9888	0.0176	0.0265	1.0153	315.436	315.110
16	0.662	0.9877	0.0176	0.0257	1.0134	315.327	315.010
20	0.655	0.9857	0.0177	0.0246	1.0102	315.166	314.860
24	0.647	0.9834	0.0178	0.0232	1.0066	314.970	314.660
28	0.638	0.9802	0.0179	0.0214	1.0017	314.719	314.470
32	0.626	0.9758	0.0180	0.0192	0.9951	314.397	314.210
36	0.612	0.9709	0.0181	0.0167	0.9876	314.022	313.870
40	0.595	0.9646	0.0182	0.0136	0.9782	313.559	313.490

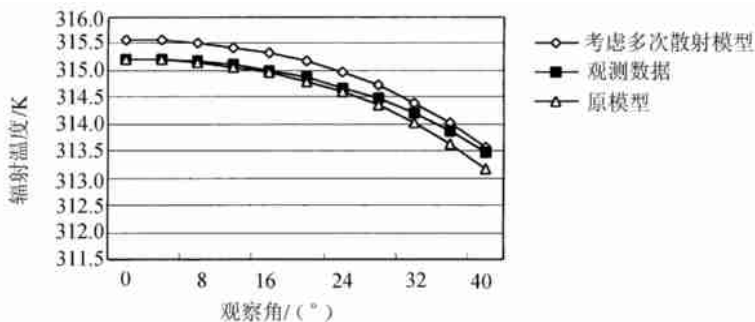


图 2 球形几何体模拟观测像元的模型计算结果和观测数据的比较

Fig.2 Model prediction and measurement data on spherical samples

从以上的模型计算和与观测数据的对比中可以看到,原模型在接近天顶方向上与室内模拟观测数据的吻合较好,考虑多次散射的模型预测值在天顶角大于 20 度以后比原模型更接近观测数据值。

### 3.2 像元发射率中多次散射贡献的方向性与结构参数的关系

为了进一步考察像元发射率中多次散射的贡献与像元结构的关系,以球形几何体为例,对组分面积比不同情况下多次散射的贡献进行了模型计算,图 3 所示为组分间多次散射对像元发射率贡献的方向性,其中  $R$  为球形几何体的半径,组分面积比随  $R$  的变化而改变。图 4 为与图 3 对应的几何体组分面积比的变化及其方向性。

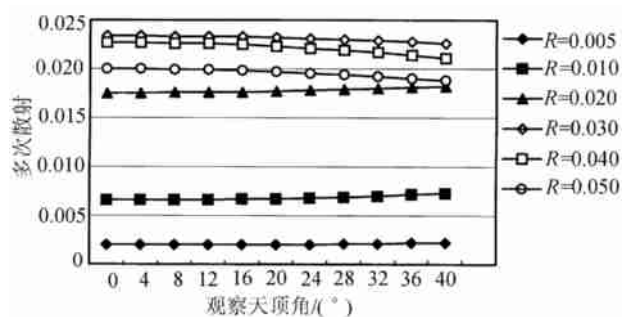


图 3 组分间多次散射对像元发射率贡献的方向性

Fig.3 The directionality of the multiple scattering between components

如图 3、4 所示,当几何体组分面积比较大时,天顶观测方向上多次散射的贡献要大于大天顶角观测

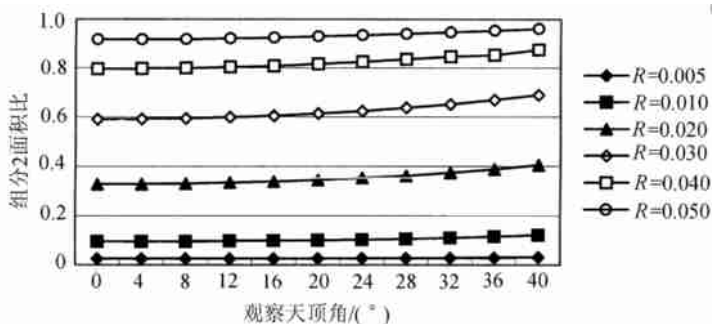


图 4 球形几何体组分在像元中的面积比

Fig.4 Areal ratio of spherical samples in pixel

情况下多次散射的贡献。这是因为在大天顶角观测情况下,几何体组分面积比大大增加,例如当球体半径  $R$  大到  $0.05\text{cm}$ ,在观察天顶角为  $40^\circ$  时,几何体组分的观察面积比达到  $0.961$ ,这时组分间的多次散射很难逸出像元到达传感器,致使多次散射的贡献减小,像元总辐射中大部分为几何体组分顶部的直接辐射的贡献。在一定条件下,多次散射的贡献会随着几何体组分面积比的减小而增加,但这种贡献的方向性特征基本不变。

但是当几何体组分面积比减小到一定程度,如图示,当球体半径  $R=0.02\text{cm}$  时,在观察天顶角为  $40^\circ$  处几何体组分面积比减小到  $0.405$ ,这时组分间的多次散射在大天顶角观测方向上也能够较多地逸出像元而形成对像元总辐射的贡献,并且有可能超过天顶观测方向的贡献量。另一方面,严格讲几何体组分内的开放度具有复杂的三维分布,而目前的模型中采用开放度的半球平均来近似以求模型的简洁和实用,这也可能是造成多次散射在大天顶角观测方向上贡献加大的原因之一。

从图 3 中还可以看到,当几何体组分的面积比减小到很小时,组分间多次散射的贡献随之减小到可以忽略的量值。这说明我们在组分的面积比很小时忽略多次散射影响的方法是可行的,也证明了新模型在不考虑多次散射影响情况下可以收敛到式(6)的简单模型。

## 4 讨论与结论

在非同温像元热辐射方向性模型中,如何定量描述多次散射的影响,是建立模型中的重要一环。本文的工作以随机分布的二组分非同温像元为例,依从几何光学模型的原理,以像元的三维结构参数为基础,来考虑像元内的多次散射过程,从而推导出

对像元方向性热辐射贡献部分的解析模型。模型的特点是适用于三维结构非同温像元的尺度,并且可以较方便地将二组分的情况扩展到多组分的情况。用实验数据的验证结果表明,模型可以满足应用精度的要求。

值得进一步讨论的是,在现有的多次散射模型中,我们略去了组分之间的观察系数  $VF_{2-2}$  的影响,这在组分 2 的空间分布呈稀疏状时是合理的。但当组分 2 空间分布密集时,  $VF_{2-2}$  的影响不可忽略,这时可以延用本文所述的建模思路定量描述这部分组分 2 间多次散射的贡献,但会使模型较目前的复杂些。另一方面,用野外实验数据的验证还有待于配套的实验数据。

## 参考文献 (References)

- [1] Li Xiaowen, Strahler A. H., Friedl M., A Conceptual model for effective directional emissivity from non-isothermal surface [J]. *IEEE Trans. on GARS*, 1999, **37**(5):2508-2517.
- [2] Li Xiaowen and Strahler, A. H. Geometric-Optical modeling of a conifer forest canopy [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1985, **GE-23**(5):705-721.
- [3] Wang Jindi, Li Xiaowen, Sun Xiaomin, Liu Qiang, Component Temperatures Inversion for Remote Sensing Pixel Based on Directional Thermal Radiation Model [J]. *Science in China (Series E)*, 2000, **43**(Suppl):41-47. [王锦地, 李小文, 孙晓敏, 刘强, 用热辐射方向性模型反演非同温像元组分温度[J]. *中国科学(E 辑)*, 2000, **43**(增刊):41-47].
- [4] Chen Liangfu, Zhuang Jiali, Xu Xiru, Zhang Renhua, Su Hongbo, Simulation and Test of Radiant Directionality of Non-isothermal Target [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, **4**(Suppl):48-52. [陈良富, 庄家礼, 徐希孺, 张仁华, 苏红波, 非同温离散体热辐射方向性模拟与验证[J]. *遥感学报*, 2000, **4**(增刊):48-52.]
- [5] Su Lihong, Study on Land Surface Directional Thermal Emission and Scale Effects [D]. PhD dissertation, 2000. [苏理宏, 地表热红外辐射方向性与尺度效应研究[D]. 博士学位论文, 2000.]
- [6] Su Hongbo, Wang Jindi, Li Xiaowen, Zhang Renhua, Tang Xinzhai, Sun Xiaomin, The Indoor Simulation and Validation of Thermal Radi-

- ation Directionality Model for Three Dimensional Surface with Heterogeneous Temperature [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, **4**(Suppl):71-80. [苏红波, 王锦地, 李小文, 张仁华, 唐新斋, 孙晓敏, 三维非同温表面热辐射方向性模型的室内模拟验证[J]. 遥感学报, 2000, **4**(增刊):71-80.]
- [7] Li, Xiaowen and Strahler, A. H., Geometric-Optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: Effect of crown shape and mutual shadowing [J]. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1992, **30**(2):276-292.
- [8] Li Xiaowen, Wang Jindi, A. H. Strahler, A Hybrid Geometric Optical-Radiative Transfer Approach for Modeling Light Absorption and Albedo of Discontinuous Canopies [J]. *Science in China (Series B)*, 1994, **24**(8):828-836. [李小文, 王锦地, A. H. Strahler, 不连续植被及其下地面对光辐射的吸收与反照率模型[J]. 中国科学(B辑), 1994, **24**(8):828-836.]
- [9] Wang Jindi, Xiang Yueqin, Li Xiaowen, Modeling the Openness Distribution and Radiative Transmission within Tree Crown Canopy, Measurement and Validation [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1999, **3**(4):279-284. [王锦地, 项月琴, 李小文, 考虑开放度的树冠层辐射传输模型及实验验证[J]. 遥感学报, 1999, **3**(4):279-284]
- [10] Li X., Ni W., Wang J., Hu B., Woodcock, C., Strahler, A. H., Decoupling path-scattering of light in a homogeneous layer and multiple bouncing at its non-Lambertian bottom [J]. *Science in China (Series E)*, 1996, **26**(5):457-466. [李小文, 倪文革, 王锦地, 胡宝新, C. Woodcock, A. H. Strahler, 光在介质层中的路径散射及在垫面的多次反弹[J]. 中国科学(E辑), 1996, **26**(5):457-466.]

## An Analytical Thermal Emission Model on the Effect of Multiple Scattering for 3-D Structural Pixel and the Model Validation

WANG Jin-di<sup>1</sup>, LI Xiao-wen<sup>1,2</sup>, SU Hong-bo<sup>3</sup>, JIAO Zi-ti<sup>1</sup>

(1. Research Center for Remote Sensing and GIS, Department of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Center for Remote Sensing and Department of Geography, Boston University, MA 02215, USA; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** For a remote sensing pixel with 3D surface, the directionality of thermal emission depends on the component parameters of the pixel, such as component temperatures, component emissivities and structural parameters. The contribution of the multiple scattering between components to the directional thermal emission is mainly affected by the 3D structure of pixel. In this paper, we present an analytical model to describe the multiple scattering between components and its contribution to the pixel's emission. The modeling work is based on the conceptual geometric-optical thermal emission model. For the non-isothermal pixel with random distributed components, at the pixel's scale, the openness coefficient and viewing factor is defined, the effect of multiple scattering between components is modeled with the principle of multiple bouncing. Then the directional thermal emission of pixel is derived based on the areal weighted emission of components by taking the ambient radiation into account.

The model is validated using measurement data indoor. The two experimental data sets are on different observing object (samples of pingpong spheres and simulated trees made of cotton). Each set of measurement data includes directional thermal emission of pixel, the emission of components, the ambient thermal radiance, and the structural parameters of the pixel. These measured data of components are as input of the model, the brightness temperature of the pixel is calculated. The model predicted brightness temperatures and their comparison with the measured brightness temperature in pixel scale are presented in the paper. The directionality of the effect of multiple scattering is also discussed. The result demonstrates that in pixel scale the analytical model prediction fits the measurement well. Note that in the multiple scattering effect model, when the samples on the background are very close to each other and the viewing factor  $VF_{2-2}$  can not be ignored, our modeling methodology can still apply. But the results formula will then be very complicated. In such case, a two layer multiple bouncing model would be more appropriate.

**Key words:** non-isothermal pixel; directional thermal emission; geometric-optics model; multiple scattering