

地表非同温像元发射率的 Monte Carlo 模拟*

苏理宏¹ 李小文^{1,2} 王锦地¹

1. 北京师范大学遥感与地理信息系统研究中心, 北京 100875;

2. Center for Remote Sensing and Dept. of Geography, Boston University, Boston, MA, 02215, USA

摘要 在进一步阐释地表非同温像元发射率的定义和 Monte Carlo 模拟方法的基础上, 对在同温像元上使用基于 Kirchhoff 定律的模拟方法提出了不同的看法.

关键词 Monte Carlo 模拟 发射率 热辐射方向性 非同温像元

同温是 Planck 定律和 Kirchhoff 定律适用的基本条件, 但是在对地观测中, 非同温遥感像元是普遍存在的, 为使 Monte Carlo 模拟和地表非同温像元发射率的定义建立在清晰的物理概念上, 我们重述 Planck 定律、方向波谱发射率和 Kirchhoff 定律. Planck 黑体辐射公式描述黑体表面辐射能量与波长和表面温度的关系, 可简化为

$$M_{\lambda}(T) = \frac{C_{\lambda}}{e^{D_{\lambda}/T} - 1}, \quad (1)$$

其中 C_{λ} 和 D_{λ} 为波长的函数^[1], M_{λ} 是波谱辐射亮度, 为黑体表面温度 T 的函数. 黑体表面吸收率、发射率均为 1, 无反射, 其辐射各向同性. 自然物体表面在给定温度下的辐射可用同一温度下的 $M_{\lambda}(T)$ 来描述

$$B_{\lambda}(T) = \epsilon_{\lambda}(\theta, \varphi, T) \cdot M_{\lambda}(T). \quad (2)$$

方向光谱发射率 $\epsilon_{\lambda}(\theta, \varphi, T)$ 虽然与波长、方向和表面温度都有关系, 但主要由材料性质决定. 它通常在较大的温度变化范围内为常数, 极便于测量和对材料性质的理解, 因此常不注为温度的函数.

Kirchhoff 定律定义了物体发射能力和吸收能力之间的关系, 最通用的形式为^[1]

$$\epsilon(\lambda, \theta, \varphi, T) = \alpha(\lambda, \theta, \varphi, T), \quad (3)$$

反映材料特性之间的固定关系. 应该注意到(3)式的适用条件是同温表面, Kirchhoff 定律也可以推广到局地热平衡条件, 没有净热交换时, 辐射能量等于吸收能量.

1 非同温像元的 Monte Carlo 模拟

非同温像元内具有不同温度的组分, 可以认为各组分是分别处于各自的局地热平衡状态, 对于处于局地热平衡的像元组分, Planck 定律和 Kirchhoff 定律成立. 但是像元作为整体是非同温的, 在像元尺度上 Planck 定律和 Kirchhoff 定律的适用性和尺度效应需要仔细研究^[2]. 如对 V 形谷, 当两侧温度相同时, 多次散射对 V 形谷热辐射的贡献可以用 Kirchhoff 定律计算^[3]; 而当两侧温度不同时, 如 $T_2 = T_1 + \Delta T$, 由于温度增量 ΔT 而产生的辐射增量 ΔB 则无法再通过 Kirchhoff 定律计算. ΔB 中直射出谷口的部分, 可以用几何光学模型计算, 但 ΔB 中射往对面这一部分如何多次散射, 李小文等^[4]的模型(简称 LSF 模型)作为非同温像元方向性热辐射的近似忽略了这部分多次散射. 这一忽略究竟带来多大误差, 是本文要加以估计的. 为了模拟非同温组分的热辐射, 我们设计了正向跟踪的 Monte Carlo 方法. 即像元内不同温度组分的热辐射以光子为单位发射, 光子在像元内组分间多次散

2001-05-14 收稿, 2001-08-15 收修改稿

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

E-mail: lihongsu@fm365.com

射,直到光子被某组分吸收或逸出像元,逸出像元的光子就是非同温像元的热辐射.这里研究的是非同温像元热辐射的瞬时状态,认为组分温度保持不变,而且不涉及光子与组分相互作用的微观物理过程,以组分为 Lambert 发射源和反射体来界定组分自身内在的物理现象和组分向外界发射和反射能量的性质.非同温像元热辐射的 Monte Carlo 方法模拟流程如下:

(1) 设置像元尺寸和结构参数,如对水平均匀冠层,要给出叶面积指数.

(2) 给定模拟的波长 λ ,可知一个光子携带的能量 $Q_0 = hc/\lambda$ (J),这里 h 是 Planck 常数, λ 是波长, c 是光速.设定组分温度和组分比辐射率,由 Planck 定律可得模拟像元上各组分的辐射能量,进而得到各组分辐射的光子数目.

(3) 组分发射光子,光子在不同组分间多次反射,直到光子被某组分吸收或逸出像元.

(4) 计数逸出像元的光子就可以得到非同温像元热辐射在 2π 空间的分布.

由此可知,我们可以模拟温差对非同温像元热辐射特征的贡献.详细的计算方法参见文献[5].模拟结果可以用来验证非同温像元发射率的定义.显然当组分温度设置相同时,模拟得到的是同温像元的热辐射.

2 同温像元热辐射的 Monte Carlo 模拟

陈良富等^[6]也使用 Monte Carlo 方法模拟混合像元的热辐射方向性,但他们采取逆向跟踪方式.主要技术路线是,让光子沿某一方向入射冠层,统计被冠层吸收的分额,吸收率被认为是冠层在该角度的有效发射率.该模拟依据的物理原理是 Kirchhoff 定律 $\epsilon(\theta, \varphi) + \rho_{\theta, \varphi \rightarrow \Omega} = 1$,其中 $\rho_{\theta, \varphi \rightarrow \Omega}$ 是方向-半球反射率.但这种基于冠层反射的模拟只能得到冠层在同温状态下的有效发射率.由(3)式可知, Kirchhoff 定律只适用于处于局地热平衡条件的像元组分,在像元尺度上使用 Kirchhoff 定律模拟混合像元的吸收率来计算发射率,事实上,已经隐含整个像元处于热平衡状态,即该 Monte Carlo 模拟的工作条件是同温像元.如声称该模拟可用于非同温像元热辐射模拟,显然混淆了组分的局地热平衡状态和像元的非同温条件,非同温像元不符合 Kirchhoff 定律的适用条件.

3 Monte Carlo 模拟验证非同温像元发射率定义

在遥感像元尺度上,李小文等^[4,7]定义的非同温像元有效发射率(LSF 模型)为

$$\epsilon_0 = \epsilon_{\text{BRDF}} + \Delta\epsilon(T | T_0), \quad (4)$$

这里 T_0 是根据应用要求定义的像元参考温度, $\epsilon_{\text{BRDF}} = \bar{\epsilon} + \Delta\epsilon_{\text{multi}}$ 为由地表材料与结构决定的、在假定为同温(T_0)条件下的发射率(即 r -发射率^[8]);其中 $\bar{\epsilon}$ 是不考虑多次散射时的像元内各组分材料发射率面积加权的平均材料发射率; $\Delta\epsilon_{\text{multi}}$ 为像元内多次散射影响造成的发射率增量; $\Delta\epsilon(T | T_0)$ 为在给定材料、结构与温度分布(T)情况下由对 T_0 的温差造成的视在发射率增量.由此,非同温像元的热辐射由像元尺度上的平均温度、有效辐射率 ϵ_0 和 Planck 定律给出

$$L_{\lambda, \theta}(T_0) = \epsilon_0(\lambda, \theta) \cdot M_{\lambda}(T_0). \quad (5)$$

可以看出,LSF 模型在同温条件下考虑组分间多次散射,用几何光学模型考虑非同温组分热辐射的贡献,而忽略像元组分温差对多次散射影响.它的意义在于:

(1) 具有实用性,当面对数 10 m 到数 km 空间分辨率的遥感信息时,应用往往要求有一个像元上的平均温度.不允许用户定义像元上的平均温度将使热红外遥感应用陷入困境.

(2) 等效发射率 ϵ_0 的定义解决了非同温像元条件下方向波谱发射率经典定义不适用的问题.它的基本思想是,通过定义像元尺度上的平均温度和有效发射率,对 Planck 定律做尺度纠正^[2].此问题由李小文提出^[2,4,7,9],1997 年立项的攀登项目(95-预-38)就是以地表热辐射的方向性机理为核心展开研究的,非同温地表有效或等效辐射率的定义是其最基本的问题.此前,人们往往把 Planck 定律、Kirchhoff 定律和方向光谱发射率 $\epsilon_{\lambda}(\theta, \varphi, T)$ 直接用于遥感像元的复杂地表(例如文献[10]),而没有意识到它们的适用条件问题.另一方面,正是由于这些“直接应用”没能建立在正确定义的基础上,长期以来影响了地温遥感精度的提高.而 LSF 模型对 ϵ_0 的定义,使像元尺度上量与量之间的关系清晰地建立了起来.

陈良富等^[6]的模拟中, 基于 Kirchhoff 定律, 用 Monte Carlo 逆向跟踪方法计算组分有效发射率, 显然, 得到的只能是组分在同温条件下的有效发射率, 他们用这一同温组分有效发射率结合 Planck 定律计算非同温组分热辐射, 将组分热辐射之和当作非同温像元的热辐射. 这样, 组分温差并没有在 Monte Carlo 模拟中体现出来, 不是真正的非同温模拟. 并且, 非同温像元的热辐射是通过几何光学模型公式计算所得, 而不是通过直接模拟所得, 事实上这只是模型的实现.

为了验证非同温像元发射率的定义, 在我们的 Monte Carlo 模拟中使用只保留叶片和土壤两种组分的简单水平均匀冠层. 设土壤为 300 K 的黑体, 所用叶片温度 300 K, 发射率 0.96, 呈球面型叶倾角分布, 叶面积指数(LAI)为 10 来模拟同温半无限水平均匀冠层. 假设土壤为黑体, 目的是简化计算, 因在同温半无限均匀冠层深处, 光子由于多次散射很难逸出, 已构成同温黑体腔. 对比同温半无限水平均匀冠层的模拟热辐射与被广泛使用的 Hapke 公式^[11]值, 表明模拟值与理论值基本一致, 正向跟踪的 Monte Carlo 方法正确模拟了方向性热辐射. 我们在上述半无限冠层之上累加一个叶片温度 296K, 发射率 0.96, 球面型叶倾角分布, LAI 为 1 的叶片层, 形成非同温冠层. 在半无限冠层再加上一个小 LAI 的不同温叶层, 是为了利用已公认的理论成果(Hapke 公式)来计算 LSF 模型中的 ϵ_{BRDF} , 并验证温差对冠层方向性热辐射的贡献.

从冠层亮温模拟值与 T_0 取 298 K 的 Hapke 值和 LSF 值(见图 1), 可以看出温差的影响必须考虑.

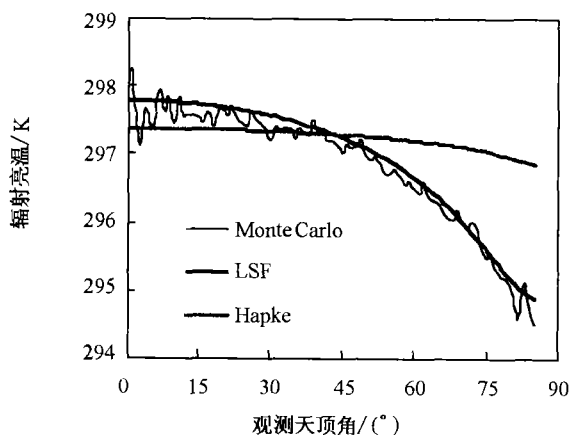


图 1 非同温冠层热辐射不同模式的计算结果

模拟结果反映了包括不同温组分间多次散射在内的全部多次散射时, 像元方向性热辐射的变化; 而 LSF 结果反映的是忽略像元组分温差对多次散射影响时, 像元热辐射 LSF 模型计算值; 显然忽略组分温差对多次散射的影响而带来的误差并不大, 是可以忽略的.

野外试验^[12]也显示式定义(4)和(5)的有效发射率 ϵ_0 可以反映非同温混合像元热辐射方向性变化规律.

4 结论

本文采用的 Monte Carlo 模拟方法满足了 Planck 定律和 Kirchhoff 定律的适用条件, 是考察非同温像元热辐射特性的合理可行的方法. 本文的论证说明只有正向跟踪的 Monte Carlo 方法才能模拟非同温像元的热辐射, 验证非同温像元有效比辐射率的定义.

参 考 文 献

- 1 西格尔 R, 等. 曹玉璋, 等译. 热辐射传热. 北京: 科学出版社, 1990
- 2 李小文, 等. 非同温黑体表面上普朗克定律的尺度效应. 中国科学, E 辑, 1999, 29(5): 422
- 3 苏理宏, 等. 三维结构非同温像元热辐射的尺度效应. 自然科学进展, 2002, 12(1): 51
- 4 Li X, et al. A conceptual model for effective directional emissivity from nonisothermal surfaces. IEEE Transactions on Geosci and Remote Sens, 1999, 37(5): 2508
- 5 苏理宏, 等. 水平均匀冠层热辐射的计算机模拟和模型验证. 遥感学报, 2000, 4(增刊): 53
- 6 陈良富, 等. 非同温混合像元热辐射有效比辐射率概念及其验证. 科学通报, 2000, 45(1): 22
- 7 李小文, 等. 地表非同温像元发射率的定义问题. 科学通报, 1999, 44(5): 1612
- 8 Norman J, et al. Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surface. Agriculture and Forest Meteorology, 1995, 77: 153
- 9 Li X, et al. Scale effects and scaling-up geometric-optical model. Proceedings of IGARSS' 99, 1999, Piscataway, N J : IEEE, 1c1998. 1875
- 10 Wan Z, et al. A generalized split-window algorithm for retrieving landsurface temperature from space. IEEE Trans on Geosci and Remote Sens, 1996, 34(4): 892
- 11 Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy 1. Theory. Journal of Geophysical Research, 1981, 86(B4): 3039
- 12 苏理宏, 等. 非同温表面热辐射方向性 LSF 概念模型的野外试验验证. 遥感学报, 2000, 4(增刊): 81