

文章编号: 1007-4619 (2000) 03-0189-05

# 宽波段热红外方向性辐射建模

阎广建<sup>1</sup>, 李小文<sup>2</sup>, 王锦地<sup>2</sup>, 朱重光<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 北京师范大学 资源与环境学院, 北京 100875)

**摘 要:** 温度和发射率的常规定义均是针对均匀同温的物体, 但陆地表面通常是既不同温又不均匀, 热辐射的方向性不可忽略。在一个概念模型的基础上, 把复杂的不同温地表分解为若干均匀同温的组分, 建立宽波段热红外方向性辐射模型, 并针对一个不同温的叶子冠层进行了建模及反演的实验研究。对反演结果的统计分析表明, 此模型有较高的抗噪声能力, 当冠层顶部及底部温度的先验预测值存在 2K 偏差, 观测噪声等效温差 ( $NE\Delta T$ ) 为 0.29K 时, 顶层及底层的平均反演温度与模拟真实值的偏差分别为 0.08K 和 0.24K, 反演所得结果的标准偏差分别为 0.15K 及 0.48K。

**关键词:** 组分温度; 发射率; 方向性辐射; 反演

**中图分类号:** TP722.5      **文献标识码:** A

## 1 引 言

陆地表面温度在土壤湿度估算、显热及潜热通量反演等涉及地表能量交换的计算中, 是一个非常重要的参数<sup>[1]</sup>。对于均匀同温的物体表面, 温度及发射率满足普朗克定律。为了得到表面温度, 必须知道物体的发射率。但是不同波段的发射率也不一样,  $N$  个测量波段总对应着  $N+1$  个未知参数。为了解决这种不定解问题, 近年来涌现了大量的算法, 如分窗算法<sup>[2]</sup>, 日-夜算法<sup>[3]</sup>和温度与发射率分离算法<sup>[4]</sup>。所有这些方法都是基于物体为均匀同温的假设, 但地面上几乎没有这种理想的物体。而且当地表呈现三维特征时, 热辐射的各向异性会更为明显。Kimes 测得一个 3 层植被从天顶到接近水平观测方向的等效辐射温度有 2K 的差别<sup>[5]</sup>。对于雪地, 不考虑这种各向异性将导致 3K 的误差<sup>[6]</sup>。Balick 和 Hutchinson 更观测到落叶林的方向辐射温差可达 7K<sup>[7]</sup>。

为了满足适用于同温表面的普朗克定律及基尔霍夫定律, 一些科学家试图定义集总的方向“ $e$ ”发射率和“ $r$ ”发射率<sup>[8]</sup>。但这些定义并不能完全满足估计地表温度的需要。本小文等人提出了一个能够

描述不同温表面方向性辐射的概念模型<sup>[9]</sup>。在此概念模型中, 承认地表不再是同温的物体, 而是有不同的组分温度, 同时构造了等效发射率。这个等效发射率一部分由地表的二向性反射分布函数(BRDF)决定, 另一部分是由组分温度的差别引起的等效发射率。我们这里简称此模型为 LSF 模型。LSF 模型为不同温地表热辐射的方向性建模奠定了基础, 经适当的扩展可适用于不同的地物。另外, LSF 模型是一个光谱辐射模型, 应用到通常的宽波段热辐射 (8-14 $\mu\text{m}$ ) 时, 需要进行大量的积分运算来满足实用精度的要求。本文在合理假设的前提下, 建立了宽波段的热辐射模型而无需积分运算, 因此可利用标准的反演算法来反演地表温度。

## 2 LSF 概念模型

多数地表富含三维结构, 所发射的热辐射也是各向异性的。假设遥感像元由两个有明显差异的组分组成(这里每个组分都可视为均匀、同温的物体), 在忽略多次散射的情况下,  $\mu$  方向的光谱辐射可以表示为:

$$L_{\lambda}(\mu, T_0) = f_1(\mu) \epsilon_1 B_{\lambda}(T_1) + f_2(\mu) \epsilon_2 B_{\lambda}(T_2) \quad (1)$$

收稿日期: 1999-04-30; 修订日期: 1999-09-08

基金项目: 国家“攀登计划”95-Y-38和 NASA NAG 5-7217 项目资助

作者简介: 阎广建(1972—), 男, 1993年毕业于北京理工大学, 获学士学位。1996年毕业于北京理工大学军用光学专业, 获硕士学位。现为中科院遥感应用研究所博士生。主要从事遥感模型的反演研究。

其中  $f_1(\mu)$  和  $f_2(\mu)$  为  $\mu$  方向观测到的两个组分所占的面积比,  $T_1, T_2$  为相应的独立于波长的组分温度,  $\epsilon_1, \epsilon_2$  为组分发射率,  $B_\lambda(T_1)$  和  $B_\lambda(T_2)$  分别表示温度为  $T_1$  和  $T_2$  的黑体的光谱辐射。  $T_0$  则是由等效发射率  $\epsilon_0(\mu, \lambda)$  和普朗克方程决定的参考温度:

$$L_\lambda(\mu, T_0) = \epsilon_0(\mu, \lambda) B_\lambda(T_0) \quad (2)$$

注意这里的等效发射率  $\epsilon_0$  为波长和方向的函数, 因为即使对于不同温的灰体或黑体, 也不可能同时定义不随波长和方向变化的  $T_0$  和  $\epsilon_0$ 。为了定义一个不随波长和方向变化的  $T_0$ , 李小文等人进行了如下近似<sup>[9]</sup>:

假设  $T_1 < T_2$ , 定义:

$$\Delta T_1 = T_0 - T_1$$

$$\Delta T_2 = T_2 - T_0$$

采用一级 Taylor 近似有:

$$B_\lambda(T_2) = B_\lambda(T_0) + B'_\lambda(T_0)\Delta T_2 \quad (3)$$

$$B_\lambda(T_1) = B_\lambda(T_0) + B'_\lambda(T_0)\Delta T_1 \quad (4)$$

其中  $B'_\lambda(T_0)$  为  $B_\lambda$  在温度  $T_0$  处的一阶偏导数, 可以表示为  $B_\lambda(T_0) \times K_\lambda(T_0)$ ,  $K_\lambda(T_0)$  为波长  $\lambda$  和  $T_0$  的函数:

$$K_\lambda(T_0) = \frac{D_\lambda e^{D_\lambda/T_0}}{T_0^2 (e^{D_\lambda/T_0} - 1)} \quad (5)$$

其中  $D_\lambda$  为:

$$D_\lambda = \frac{1.439 \times 10^4}{\lambda}$$

这里  $\lambda$  的单位为  $\mu\text{m}$ ,  $D_\lambda$  的单位为  $\text{K}$ ,  $K_\lambda(T_0)$  的单位为  $\text{K}^{-1}$ ,  $B_\lambda$  和  $L_\lambda$  的单位均为  $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ 。

利用(3)–(5)式化简(1)式可得:

$$L_\lambda(\mu, T_0) = [f_1(\mu)\epsilon_1 + f_2(\mu)\epsilon_2]B_\lambda(T_0) + [f_2(\mu)\epsilon_2\Delta T_2 - f_1(\mu)\epsilon_1\Delta T_1]K_\lambda(T_0)B_\lambda(T_0) \quad (6)$$

对于给定的方向  $\mu$ , 可以选取合适的  $T_0$  使得:

$$f_2(\mu)\epsilon_2\Delta T_2 = f_1(\mu)\epsilon_1\Delta T_1 \quad (7)$$

于是(6)式与(2)式取得了形式上的一致, LSF 模型中称此温度为参考温度。但是对于多个观测方向, 不可能给定一个单一的  $T_0$  对所有的方向(7)式都成立, 此时可以选择一个  $T_0$  使得(7)式在半球平均的意义上成立。

值得注意的是(1)式和(6)式均没有考虑组分之间的多次散射, 于是 LSF 模型中引入了基于半球-方向反射率  $r(\mu)$  和基尔霍夫定律的方向“ $r$ ”发射率

$$\epsilon_{\text{BRDF}}: \quad \epsilon_{\text{BRDF}} = 1 - r(\mu) \quad (8)$$

$\epsilon_{\text{BRDF}}$  考虑了多次散射, 只由地表的组分发射率和几何结构决定。引入  $\epsilon_{\text{BRDF}}$  后的(6)式可以简单地扩展到由多种组分组成的复杂地表:

$$L_\lambda(\mu, T_0) = \epsilon_{\text{BRDF}} B_\lambda(T_0) + \sum_i f_i(\mu) \epsilon_i \Delta T_i K_\lambda(T_0) B_\lambda(T_0) \quad (9)$$

其中  $f_i(\mu)$  是像元中第  $i$  个组分所占的比例,  $\epsilon_i$  为组分发射率,  $\Delta T_i$  是对应的组分温度与参考温度  $T_0$  的差值。

可见(9)式由两项辐射组成, 一项可以认为来源于地表的不均匀性, 第二项则考虑了不同组分的温度分布, 是对不均匀、不同温地表方向性光谱辐射的定量描述。

### 3 宽波段热红外辐射建模

所有的探测器都有一定的光谱响应范围。LSF 模型考虑的是固定波长的热辐射, 当波段范围较窄时, 我们可以选择中心波长来计算, 但对于通常的热红外测量波段(8–14  $\mu\text{m}$ ), 这样近似所带来的误差就不可忽略。于是在波段范围内的数值积分就必不可免, 但是前向模型的积分往往使得反演的运算量十分巨大乃至无法得到实用的精度和速度要求。本文给出一种有效的近似方法, 并建立了宽波段的热红外方向性辐射模型。

对于较宽的热红外测量波段, 组分发射率  $\epsilon_i$  可以认为是波段平均的效果, (1)式可写为:

$$L_{\Delta\lambda}(\mu, T_0) = f_1(\mu)\epsilon_1 B_{\Delta\lambda}(T_1) + f_2(\mu)\epsilon_2 B_{\Delta\lambda}(T_2) \quad (10)$$

这里  $\Delta\lambda$  表示波段范围  $\lambda_1 - \lambda_2$ ,  $B_{\Delta\lambda}$  和  $L_{\Delta\lambda}$  分别表示黑体和实际的地表在波段  $\Delta\lambda$  内的热辐射,  $B_{\Delta\lambda}$  可由普朗克公式在波段  $\Delta\lambda$  内积分得到。依据方程(3)–(5)有:

$$B_{\Delta\lambda}(T_2) = B_{\Delta\lambda}(T_0) + S_{\Delta\lambda}(T_0)\Delta T_2 \quad (11)$$

$$B_{\Delta\lambda}(T_1) = B_{\Delta\lambda}(T_0) + S_{\Delta\lambda}(T_0)\Delta T_1 \quad (12)$$

其中:

$$S_{\Delta\lambda}(T_0) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_\lambda(T_0) B_\lambda(T_0) d\lambda = \frac{4}{T_0} \left[ \frac{C_1 \lambda^{-4}}{4 \left( e^{\frac{C_2}{T_0 \lambda}} - 1 \right)} \right]_{\lambda_1}^{\lambda_2} + B_{\Delta\lambda}(T_0) \quad (13)$$

其中:  $C_1 = 1.191 \times 10^8 (\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^4)$ ,  $C_2 = 1.439 \times 10^4 (\text{K}\mu\text{m})$ 。

仿造(6)–(9)式的分析过程,可得:

$$L_{\Delta\lambda}(\mu, T_0) = \epsilon_{\text{BRDF}} B_{\Delta\lambda}(T_0) + \sum_i f_i(\mu) \epsilon_i \Delta T_i S_{\Delta\lambda}(T_0) \quad (14)$$

以上各式中,  $B_{\Delta\lambda}$ 和  $L_{\Delta\lambda}$ 的单位均为  $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ,  $S_{\Delta\lambda}$ 的单位为  $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{K}^{-1}$ 。

在一般情况下,地表温度不是很高(比如小于333K)。假设探测器的光谱响应范围在  $14\mu\text{m}$  以下,对普朗克方程进行一级近似  $\exp(x)^{-1} \approx \exp(x)$  有:

$$B_{\lambda}(T) = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \quad (15)$$

基于此近似,普朗克方程在波段  $\Delta\lambda$  内的积分  $B_{\Delta\lambda}(T_0)$  为:

$$B_{\Delta\lambda}(T_0) = \frac{C_1 T_0}{C_2} \lambda^{-3} e^{-\frac{C_2}{T_0 \lambda}} \left[ 1 + 3 \left( \frac{T_0}{C_2} \lambda \right) + 6 \left( \frac{T_0}{C_2} \lambda \right)^2 + 6 \left( \frac{T_0}{C_2} \lambda \right)^3 \right] \Big|_{\lambda_1}^{\lambda_2} \quad (16)$$

上式虽然避免了积分,但是其精度却较低,尤其当温度较高或波长覆盖接近  $14\mu\text{m}$  时,会有较大的偏差。我们进一步采用了下列近似。当  $x > 1$  时有:

$$\frac{1}{x-1} = \frac{1}{x} + \frac{1}{x^2} + \dots + \frac{1}{x^n} + \frac{1}{x^n(x-1)} \quad (17)$$

当  $x$  取值较大时,上式最后一项将随着  $n$  的增大而迅速减小,于是可取前  $n$  项来近似。在普朗克方程中,把  $e^{\frac{C_2}{T_0 \lambda}}$  当作  $x$ , 对于前面假设的条件(常温地表,光谱范围在  $14\mu\text{m}$  以下),取  $n=3$  或  $4$  就可得到相当高的精度。

很显然,方程(16)是  $n=1$  的特例。对于第  $n > 1$  的各项,只需要把  $C_2$  替换为  $nC_2$ , (16)式依然成立。由(16)和(17)式可以得到普朗克方程在波段内积分的近似表达式。此种近似方法能得到很高的精度。例如,当温度  $T_0=333\text{K}$ , 在  $8-14\mu\text{m}$  的光谱范围内,选  $n=3$  的绝对误差为  $0.0015(\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1})$ , 而相对误差仅为  $1.7 \times 10^{-5}$ 。当温度低于  $333\text{K}$  或波长小于  $14\mu\text{m}$  时,本近似的误差将迅速减小。

#### 4 不同温植被冠层的方向性热辐射模拟

为了检验此宽波段模型在反演时对误差的敏感性,我们考虑一个不同温的均匀叶子冠层。假设冠层只由顶层和底层叶子组成,也即两层的组分发射率一样,但有截然不同的温度。虽然此叶子冠层与实际植被覆盖的地表有一定的差距,但对于本文的研究而言,具有代表性。设顶层的叶面积指数为

$\Delta LAI$ , 则在  $\mu$  方向顶层的间隙率为:

$$f_i(\mu) = \exp(-g(\mu)\Delta LAI/\mu) \quad (18)$$

这里  $\mu$  为观测角的余弦,  $g(\mu)$  与叶角分布(LAD)有关,假设 LAD 是各向同性的,则有  $g(\mu) = 0.5$ 。  $f_i(\mu)$  代表了  $\mu$  方向探测器视场中底层所占的面积比,那么顶层所占的面积比为  $1-f_i(\mu)$ 。

基于基尔霍夫准则,方向发射率  $\epsilon_{\text{BRDF}}$  可由半球-方向反射率求得。假设叶子对于热辐射是不透明的,一个均匀的半无限叶子冠层的半球-方向反射率可以表示为<sup>[10]</sup>:

$$r(\mu) = (1-\gamma)/(1+2\gamma\mu) + 0.25\rho\mu/(1+2\mu) \quad (19)$$

其中  $\gamma = \sqrt{1-\rho}$ ,  $\rho$  为叶面反射率。

在下面的模拟数据中,我们选择了 MODIS 传感器的8个热红外波段(表1),观测天顶角的变化范围为  $0^\circ-75^\circ$ 。实验中给定冠层顶层的组分温度  $T_u$  为  $296\text{K}$ , 底层  $T_l$  为  $300\text{K}$ , 叶面反射率为  $0.04$ ,  $\Delta LAI$  为  $2.0$ , 参考温度  $T_0$  在  $T_u$  与  $T_l$  之间任选为  $297\text{K}$ , 如表2。在此给定的条件下,介于  $T_u$  与  $T_l$  之间的参考温度对模拟的热辐射的影响很小,比如选  $T_0$  为  $296\text{K}$  或  $300\text{K}$  的最大误差小于  $0.16\%$ 。模拟结果如图1。

表1 MODIS 热红外波段范围及用途

波段	带宽/ $\mu\text{m}$	主要用途
29	8.400–8.700	卷云,水汽
30	9.580–9.880	臭氧
31	10.780–11.280	地表/云的温度
32	11.770–12.270	
33	13.185–13.485	云的高度
34	13.485–13.785	
35	13.785–14.085	
36	14.085–14.385	

表2 模拟参数值

参数	$T_u/\text{K}$	$T_l/\text{K}$	$T_0/\text{K}$	$\rho$	$\Delta LAI$
模拟值	296.0	300.0	297.0	0.04	2.0

#### 5 模型反演的灵敏度分析

模型反演中,对观测噪声的灵敏度是评价一个

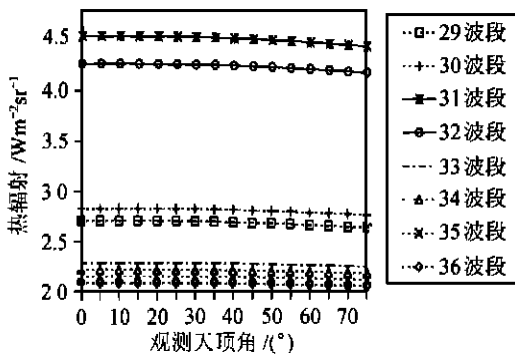


图 1 MODIS 热红外波段的模拟方向辐射

Fig. 1 Simulated directional emission at MODIS thermal bands

前向模型的关键因素。基于图 1 的模拟数据,我们利用 Powell 算法<sup>[11]</sup>研究了此模型在反演组分温度的过程中对观测噪声的敏感度。我们在模拟的 MODIS 第 31 波段的方向性热辐射的基础上,加入了不同程度的高斯分布的随机噪声作为观测值,然后反演冠层顶部及底部的温度。对于每一级别的观测噪声值,重复反演 100 次,然后统计反演所得的组分

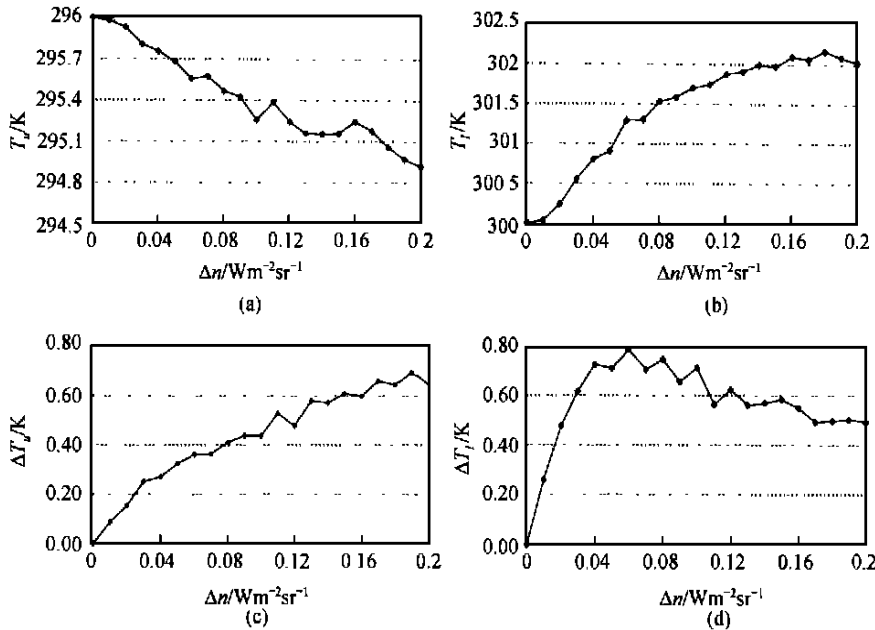


图 2 不同观测噪声的情况下,顶层温度  $T_u$  及底层温度  $T_l$  100 次反演的统计结果  
(a)  $T_u$  反演的均值;(b)  $T_l$  反演的均值;(c)  $T_u$  反演的标准偏差;(d)  $T_l$  反演的标准偏差

Fig. 2 Statistical results of 100 inversions for top layer temperature and bottom layer temperature under different noise levels

## 6 结论及讨论

常规的基于普朗克定律的温度和发射率的关系只适用于均匀同温的表面,但通常的陆地表面很难

温度的均值和方差。在反演过程中,假定顶层温度的预测值比表 2 所列的真实值低 2K,而底层温度的预测值比真实值高 2K,模型中其余的参数固定在真实值,不参加反演以重点研究温度的反演情况。反演结果如图 2。从图中可见,当源数据中没有加入噪声时,可以精确反演得参数真实值。但随着噪声的增加,反演结果的误差亦随之加大,表现为反演均值偏离真实值的同时不确定性也在加大。当观测噪声的标准偏差为  $0.02 \text{ Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  时,冠层顶部及底部反演的温度的均值与真实值之间的偏差分别小于 0.08K 及 0.24K,反演结果的标准偏差分别为 0.15K 及 0.48K。利用普朗克方程可将观测热辐射的噪声标准偏差转换为噪声等效温差 ( $NE\Delta T$ ),此处对应  $NE\Delta T$  为 0.29K,远大于 MODIS 传感器 31 及 32 波段所要求的 0.05K 的测量精度。甚至当观测噪声为  $0.1 \text{ Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  (对应  $NE\Delta T$  大于 1.46K) 时,顶层温度的反演误差(考虑标准偏差)依然在  $0.75 \text{ K} \pm 0.44 \text{ K}$  的范围内,这说明对本模型的反演有较强的抗噪声能力。

满足这两个条件。本文在李小文等人提出的概念模型的基础上建立了适用于宽波段热红外测量的方向性辐射模型,并针对半无限的均匀不同温植被冠层进行了建模及反演的研究。实验表明,此模型有较强的抗噪声能力。由于此模型采用了组分温度来考

考虑地表的不同温及三维结构所引起的热辐射的方向性,使利用对地物的方向观测数据反演地表的真实温度成为可能。作为对方向性热辐射建模的探索,本文没有考虑来自太阳及天空的长波辐射,这可能会低估野外测量的方向辐射,在模拟分析中,没有考虑太阳光照及阴影处温度的差别,不适合热辐射呈现明显方位效应的测量数据。作为将来的扩展,可以针对不同的植被建立不同的辐射模型,比如基于适用于可见光和近红外的李-Strahler 几何光学模型<sup>[12]</sup>,可以考虑光照及阴影处的温差,建立适用于稀疏林地的热红外辐射模型。对不同温的连续均匀植被,也可利用本文方法从两层扩展到多层。

## 参考文献 (References)

- [1] Hatfield, J. L., R. J. Reginato, S. B. Idso. Evaluation of canopy temperature-evapotranspiration models over various crops [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 1984, **32**: 41—53.
- [2] Wan, Z., J. Dozier. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1996, **34**(4): 892—905.
- [3] Wan, Z., Li, Z.-L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1997, **35**(4): 980—996.
- [4] Gillespie, A., S. Rokugawa, T. Matsunaga, J. S. Cothorn, S. J. Hook, A. B. Kahle. A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) images [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1998, **36**(4): 1113—1126.
- [5] Kimes, D. S., J. A. Smith, L. E. Lin. Thermal IR exitance model of a plant canopy [J]. *App. Optics*, 1981, **20**(4): 623—632.
- [6] Dozier, J., S. G. Warren. Effect of viewing angle on the infrared brightness temperature of snow [J]. *Water Resour. Res.*, 1982, **18**(5): 1424—1434.
- [7] Balick, L., B. Hutchinson. Directional thermal infrared exitance distributions from a leafless deciduous forest [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1986, **24**(5): 693—698.
- [8] Norman, J., F. Becker. Terminology in Thermal Infrared Remote Sensing of Natural Surfaces [J]. *Remote Sensing Review*, 1995, **12**: 159—173.
- [9] Li, X., A. H. Strahler, M. A. Friedl. A Conceptual Model for Effective Directional Emissivity from Nonisothermal Surfaces [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2000, **37**(5): 2508—2517.
- [10] Hapke, B. W. Bidirectional reflectance spectroscopy 1: theory [J]. *J. Geophys. Res.* 1981, **86**: 3039—3054.
- [11] Powell, M. J. D. The fast algorithm for nonlinearly constrained optimization calculations [C]. G. A. Watson. Numerical Analysis [C]. Dundee, 1977.
- [12] Li, X., A. Strahler. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of a coniferous forest canopy [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1986, **24**(6): 281—293.

## Modeling Directional Effects of Thermal Emission in Wide Band Measurements

YAN Guang-jian<sup>1</sup>, LI Xiao-wen<sup>2</sup>, WANG Jin-di<sup>2</sup>, ZHU Chong-guang<sup>1</sup>

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

2. College of Resource and Environment Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Temperature and emissivity are defined for homogeneous and isothermal surfaces. However, natural land surfaces are neither homogeneous nor isothermal. The directional effects of thermal emission can not be neglected. We developed a model to describe the directional emission of vegetation canopies in thermal infrared band based on a conceptual model. The complex nonisothermal land surfaces are separated as homogeneous and isothermal components with distinct temperature in this model. A nonisothermal leaf canopy is modeled and inverted in this paper as an illustration. By statistical analysis of the inversion results, it is shown that this model is robust to noises. When *a priori* guesses for the component temperatures have errors of 2K and the noise equivalent temperature difference ( $NE\Delta T$ ) in the observations is about 0.29K, the mean inverted temperatures have biases of 0.08K and 0.24K for the top and bottom layer respectively. The standard deviations of the inversion results are 0.15K and 0.48K respectively.

**Key words:** component temperature; emissivity; directional emission; inversion