

从宽波段热红外图像反演组分温度的相关问题讨论

——通道响应函数和比辐射率波段变化的影响

何立明^{1,2}, 阎广建¹, 王 华¹, 李小文^{1,3}

(1. 遥感科学国家重点实验室, 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 遥感与 GIS 研究中心, 北京 100875;

2. 国家环境保护总局 环境卫星中心筹备办公室, 北京 100029; 3. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要: 对于宽波段传感器, 不一定能直接由普朗克定律或者斯蒂芬-玻尔兹曼定律建立温度与辐射亮度的关系。在知道传感器通道响应函数和像元组分比辐射率波段变化的情况下, 只要恰当地拟合出黑体温度和其宽波段热辐射的对应经验关系式, 并计算一个通道响应函数加权平均的比辐射率, 则从混合像元的宽波段多角度热红外观测仍可较准确地反演组分温度。以 AMTIS 为例, 文中给出了两种拟合宽波段传感器亮度温度和辐射亮度之间关系的方式: 一种是从斯蒂芬-玻尔兹曼定律的形式出发的; 另一种则是用普朗克定律, 选择一个合适的波长, 使得 AMTIS 传感器随温度变化的热辐射曲线和普朗克函数在某个波长处的热辐射曲线两者之间尽可能地平行。文中以两个例子说明了这两种方式在宽波段传感器组分温度反演中的应用和误差, 分析了比辐射率波段变化对组分温度反演的影响。

关键词: 宽波段; 热红外; 组分温度; 误差; 通道响应函数; 比辐射率

中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

1 引言

AMTIS (Airborne Multi-angle TIR/NIR Imaging System) 是中国自行研制的机载多角度、多光谱成像系统; 其热红外波段覆盖了地物在 8—14 μm 的热辐射峰值(图 1), 主要用于组分温度反演^[1]。从宽波段热红外传感器反演组分温度涉及到两个重要问题: 一个是亮度温度与辐射亮度的相互转换; 另一个是如何使用波段平均的组分比辐射率。

对于问题一, 无论传感器输出亮度温度或辐射亮度, 用户建模时或者进行地面验证时经常需要在两者之间建立联系^[2,3]。由于通道响应函数的影响, 使其转换不能以解析的方式进行。通常有 3 种解决思路: 一种是将通道内的能量“压缩”到某个“中心波长”处^[4], 这对于窄波段的传感器是可行的, 但

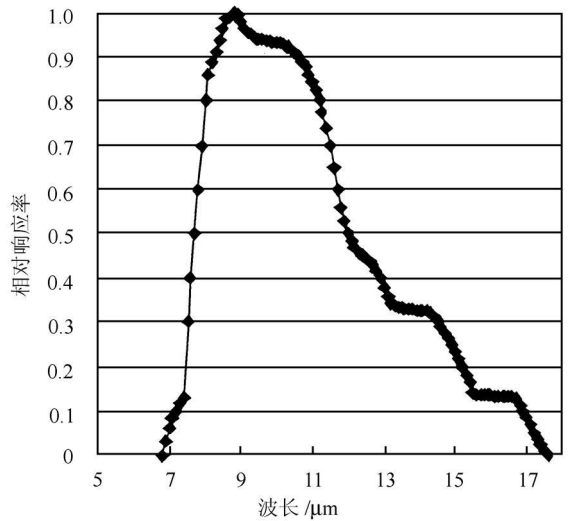


图 1 AMTIS 通道响应函数

Fig. 1 The band response function of AMTIS

收稿日期: 2003-09-09; 修订日期: 2003-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(40101020), 国家重点基础研究发展规划项目(编号: 20000G77900), 教育部优秀青年教师资助计划项目联合资助。

作者简介: 何立明(1977—)男, 现在北京师范大学资源与环境科学系遥感与 GIS 研究中心攻读博士学位, 从事地表温度反演和大气订正等工作, 已发表相关论文 5 篇。

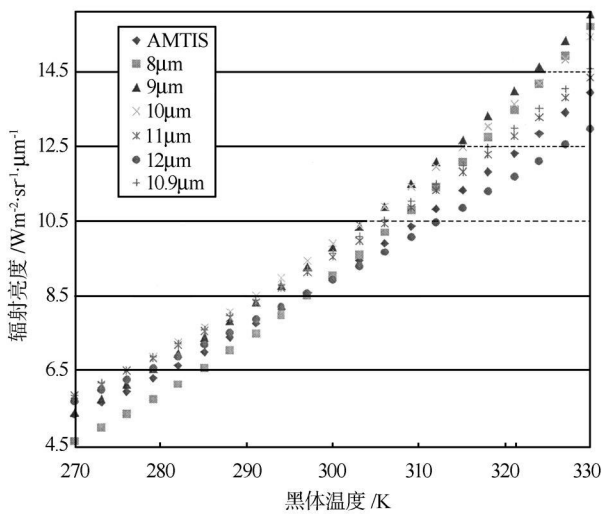


图2 不同波长的普朗克函数值

Fig.2 Radiance for different temperature and wavelength

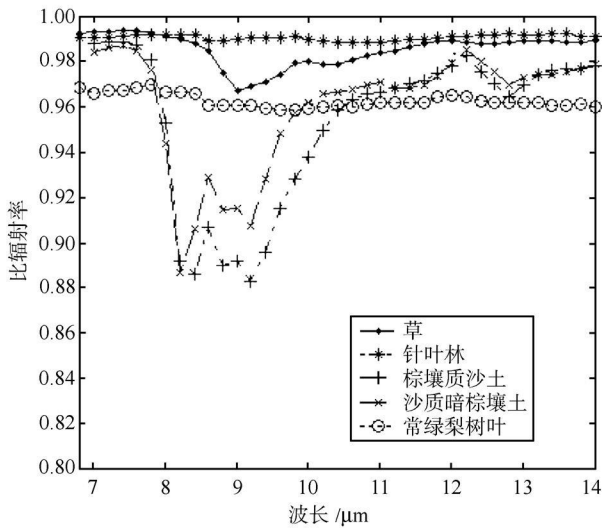


图3 几种典型地物的比辐射率

Fig.3 The emissivity for different components

用于宽波段时,往往不一定能找到这样一个中心波长(图2);一种是用全波段的积分:斯蒂芬-玻尔兹曼定律建立模型^[5-7],最后可以化简为用温度的四次方建模。我们计算了对于300K黑体AMTIS波段范围内接收的能量和全波段的热辐射,两者的比例约为1:3,直接用斯蒂芬-玻尔兹曼定律对于AMTIS并不合适;另一种“万能”的途径是建立LUT(Look Up Table-LUT)^[4]。用LUT可以达到尽可能高的精度,但是一个大的LUT,需要解决空间存贮和插值时间的问题;作为第3种方式的近似,是用LUT拟合一个经验关系式^[8-11],这种方法的缺点是由于拟合公式的物理意义不是特别明确,受通道响应函数的影响,用他们回归得出的系数往往仅仅适用于一个

小的波段区间^[12]。

问题二是比辐射率波段变化的影响^[13]。若组分是比辐射率不随波长变化的灰体,则容易建立温度与热辐射的关系。若考虑波长变化,常用的思路是计算一个波段平均的比辐射率^[14],对于窄的波段和比辐射率变化比较小的地物来说是可以的,对于宽波段的情况,比如土壤的比辐射率在8-10μm之间有较大的变化(图3)^[15],这种近似会带来多大的误差?

本文旨在回答上面的两个问题,并给出了不同解决思路可能的误差。本文第2节给出了AMTIS辐射亮度与组分温度关系的积分表达,第3节给出了对应于不同情况下的近似公式,第4节给出了用V型谷和一个混合像元模拟的结果,最后在第5节给出了有关结论。

2 宽波段传感器接收的热辐射

为简化讨论,假设像元各组分的比辐射率是各向同性的,为 $\epsilon_\lambda = \epsilon(\lambda)$;假设传感器的通道响应函数为 $S_\lambda = S(\lambda)$,为一个固定的模式。定义宽波段传感器的亮度温度 T_b 为:

$$B'(T_b) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \epsilon(\lambda) B_\lambda(T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

其中 $B'(T_b)$ 表示(1)式右边的热辐射的大小相当于用相应的传感器观测温度为 T_b 的黑体得到的热辐射,单位为 $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ 。不考虑组分之间的多次散射以及大气、环境辐射的影响,则描述传感器接收的热辐射为:

$$L = B'(T_b) = \sum_{i=1}^k P_i \left(\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_i(\lambda) \epsilon_i(\lambda) B_\lambda(T_i) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_i(\lambda) d\lambda} \right) \quad (2)$$

k 表示视场内有 k 种组分, P_i 为第 i 种组分的面积比例。当把热像仪用作机载传感器时,我们得到等效的亮度温度,并试图从多角度的亮度温度值反演组分温度。直接将(2)式用于机载图像的组分温度反演时,前向模型的积分需要大量机时,这在用于批量数据反演时是非常困难的,第3节和第4节将讨论公式(1)和公式(2)的近似及其用于组分温度反演

所带来的误差。

3 通道响应函数和比辐射率波段变化的影响

3.1 黑体或者灰体,比辐射率为 $\epsilon_\lambda \equiv \epsilon_c$;通道响应函数 $S_\lambda = C_s$,纯像元

$$B'(T_b) = \frac{\epsilon_c}{C_s \cdot |\lambda_2 - \lambda_1|} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_\lambda(T) d\lambda \quad (3)$$

上式中,只要解决了普朗克函数在一个波段范围内的积分问题,就可以用解析关系式表述温度与辐射亮度的关系^[16,17]。

3.2 黑体或者灰体,比辐射率为 $\epsilon_\lambda \equiv \epsilon_c$;通道响应函数 $S_\lambda \equiv S(\lambda)$,纯像元

$$B'(T_b) = \frac{\epsilon_c}{S_l} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) B_\lambda(T) d\lambda \quad (4)$$

其中, $S_l = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) d\lambda$ 是常数。由于 $S(\lambda)$ 一般由

数值给出,无法去计算 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) B_\lambda(T) d\lambda$ 的解析解。但通过数值积分可得到对应于某种波段响应函数下,黑体温度与上面积分值的一一对应关系(假定用 B' 表示这种对应关系),并用一个恰当的函数关系式来拟合^[8-11]。如果这个关系足够好,通过比辐射率和热像仪测量的辐射亮度(或者亮度温度)就可以反推出黑体的温度。表1给出了拟合不同形式公式的结果(x 为黑体温度;270-330K, $f(x)$ 为辐射亮度,置信度为95%)。其中用本文给出的包含斯蒂芬-玻尔兹曼定律的四次方形式的公式:

$$f(x) = ax^4 + b \quad (5)$$

拟合辐射亮度的最大误差为0.01($a=1.316 \times 10^{-9}$, $b=-1.639$),相应地,辐射亮度0.01的误差带来的估计亮度温度的误差在300K时约为0.07K。若不考虑参数个数,则三参数的二次多项式拟合精度最高。对两参数的情况,则用公式(5)来拟合精度最高。

表1 拟合不同形式公式的结果

Table 1 The statistical variables for different equations

模型	SSE	R-square	RMSE	备注(文献)
$f(x) = ax^b$	0.3646	0.9974	0.1385	Becker 和 Li ^[10]
$f(x) = p_1x^2 + p_2x + p_3$	0.0001019	1	0.00238	Richter ^[13]
$f(x) = \exp(a + b/x)$	0.003445	0.99998	0.01347	Singh ^[9]
$f(x) = a / (\exp(b/x) - 1)$	0.002041	0.99999	0.01036	Wukelic 等 ^[11]
$f(x) = p_1x + p_2$	0.8805	0.9938	0.2153	
$f(x) = ax^4 + b$	0.001004	0.99999	0.007268	本文

3.3 比辐射率的作用:通道响应函数 $S_\lambda = S(\lambda)$,比辐射率为 $\epsilon_\lambda = \epsilon(\lambda)$,纯像元

此时,(1)式中有两个非线性的函数, S_λ 和 $\epsilon(\lambda)$,这是一般的宽波段红外测温仪测量温度时的基本公式。比辐射率的作用使得同温的不同目标可能具有不同的亮度温度,也使得具有相同的亮度温度的目标有可能具有不同的真实温度。但是对于具有固定比辐射率模式的单一目标,仿照3.2中的讨论,通过计算均匀目标各个温度时相应的辐射亮度,我们期望能得到两者的一一对应关系(即不同的材料对应于不同的 $B'_i(T_b)$, i 表示不同的组分,但是这样过于繁琐)。

则我们期望:

$$L = B'(T_b) \approx \frac{\bar{\epsilon}}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) d\lambda} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) B_\lambda(T) d\lambda \quad (7)$$

(7)式将近似为(4)式。误差的大小将依赖于比辐射率的复杂程度。在温度为300K时,根据公式(6)计算图3各材料的波段平均的比辐射率依次为0.9831, 0.9905, 0.9431, 0.9535, 0.9630。温度从270K变化到330K时,比辐射率的变化小于0.005^[15]。图4和表2给出了用公式(1)和公式(7)计算的热辐射的误差,以及这个误差在相应温度下所带来的辐射亮度和亮度温度的误差。可以发现其误差大小与比辐射率的形状和计算波段平均比辐射率所采用的温度有关。从误差的大小可以看出,用波段平均的比辐射率对于一般的遥感应是可行的。

若定义宽波段的等效平均比辐射率 $\bar{\epsilon}$ ^[15]:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda) S(\lambda) B_\lambda(T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) B_\lambda(T) d\lambda} \quad (6)$$

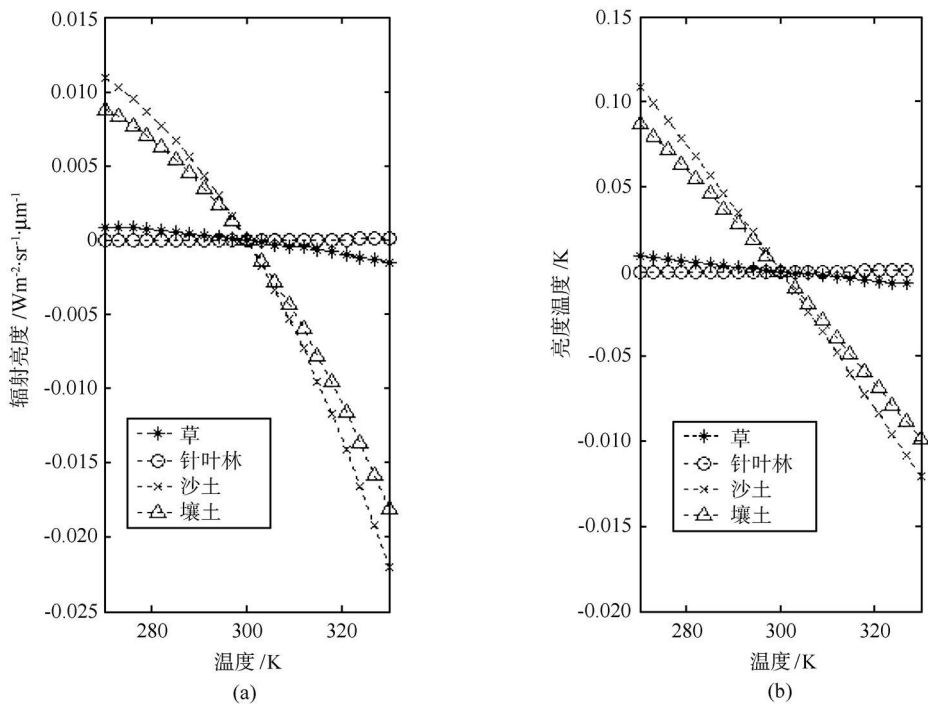


图4 用波段平均的比辐射率计算热辐射所带来的误差
Fig.4 The temperature errors due to component emissivity errors

表2 用波段平均的比辐射率计算热辐射所带来亮度温度的误差

Table 2 The temperature errors due to component emissivity errors

	草	针叶林	沙土	壤土
RMSE (R)	7.5173×10^{-4}	2.4439×10^{-5}	0.0103	0.0084
max error (R)	0.0015	6.5079×10^{-5}	0.0220	0.0181
RMSE (T)	0.0052	1.3765×10^{-4}	0.0702	0.0569
max error (T)	0.0090	3.4660×10^{-4}	0.1209	0.0990

R 表示 Radiance ($\text{W}/\text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), T 表示亮度温度, 单位为 K

3.4 通道响应函数和比辐射率的联合作用: 对于混合像元

这是最常见的情况。对于公式(2):

$$B'(T_b) = \sum_{i=0}^k P_i \cdot B'_i(T_{ib}) \quad (8)$$

$B'_i(T_{ib})$ 是对应于不同组分的辐射亮度。当从多个观测反演组分温度时, 若知道组分的比辐射率曲线形状和大小, 从积分式(2)反演组分温度是速度比较慢的, 根据 3.2 和 3.3 的讨论, 用波段平均的比辐射率, 若其误差可以接受, 则有:

$$B'(T_b) = \sum_{i=0}^k P_i \cdot \hat{\epsilon}_i \cdot B'(T_i) \quad (9)$$

类似地, 我们给出了 Kimes^[7] 文中的公式(2):

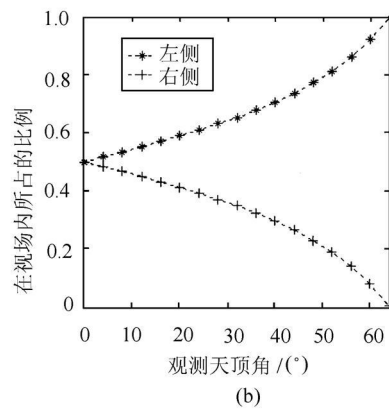
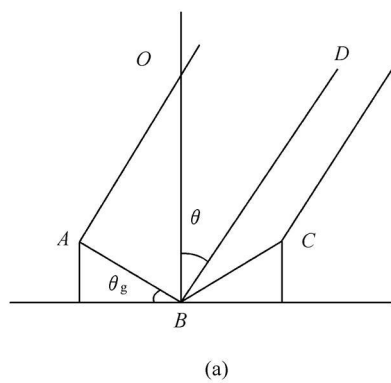
$$\hat{T}_S^4 = PGAP \cdot T_C^4 + (1 - PGAP) T_C^4 \quad (10)$$

\hat{T}_S 是冠层天顶方向的理论有效辐射温度, T_C 是地表平均有效辐射温度, T_C 是冠层平均有效辐射温度, $PGAP$ 是观测天顶方向的间隙率。Kimes^[7] 在其公式(2)和以后的文中^[5,6] 均采用有效辐射温度进行建模。将我们的拟合公式(5)代入其公式(2)^[7], 恰好能抵消其中的常数项, 用上述公式反演组分的有效辐射温度是可以的(相当于各组分为不同温度的黑体), 但是我们却不能从 AMTIS 的亮温用该公式去反演组分真实温度。

4 前向模拟与反演

为了分析用普朗克公式和式(5)用于组分温度反演可能带来的误差, 我们给出了两个例子。第一个是 V 型谷, 图 5 给出了 V 型谷的示意图和有关参数。假定传感器在无限远处, V 型谷两个侧面在观测天顶角方向投影的面积比为 A_l, A_r (A_l 表示左侧面积, A_r 表示右侧面积)。给定不同的观测天顶角, 两坡在传感器瞬时视场 (IFOV) 的比例是此消彼长, 总和为 1:

$$\begin{cases} \theta \leq \theta_g \rightarrow A_l : A_r = \sin(90^\circ - \theta_g + \theta) : \sin(90^\circ - \theta_g - \theta) \\ \theta > \theta_g \rightarrow A_l : A_r = \sin(90^\circ - \theta + \theta_g) : \sin(90^\circ - \theta_g - \theta) \end{cases} \quad (11)$$



坡长度 AB 为 L , 坡度为 $\theta_g = 30^\circ$; 假定传感器足够远, IFOV 足够小, VZN 为 $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, 传感器自天顶往右观测。

图 5 V 型谷示意图
Fig. 5 Sketch map for V shaped valley

为了单独考虑通道响应函数的影响, 假设谷的两侧为灰体, 并且比辐射率不随波长变化, 忽略谷两侧的多次反射和温差的影响, 用公式(2)的积分形式去计算观测方向的热辐射, 然后将这个热辐射转化为亮度温度, 也就是对应于 AMTIS 热像仪输出的提供给用户的亮度温度。图 6 给出了模拟的 V 型谷热辐射的方向性。灰体温度和比辐射率的设置见表 3。假定用户知道谷的形状和材料性质(两侧的比辐射率), 并试图从亮度温度去反演谷两侧的温度。

若用前向积分模型进行反演, 由于反演过程中要用到迭代, 反复调用积分模型将耗费大量的时间, 所以速度慢, 但是总能得到准确解。当用公式(5)、“最佳波长”和“响应函数峰值波长”处的普朗克公式来反演的结果见表 3。表中, ϵ_l 和 ϵ_r 分别是两侧的比辐射率, T_l 和 T_r 分别对应于两侧的温度; 0.0227K 的误差是由式(5)的误差所致; 第一行“宽波段”表示用式(5)来反演; “最佳波长”是 $10.8797\mu\text{m}$, 它是在温度范围 270—330K 之间, 根据拟合的“差的方差”最小原则(也就是确保图 2 中 AMTIS 的热辐射和某波长普朗克函数的热辐射的两条曲线尽可能平行)

拟合得到的, 用这个波长应该引起组分温度反演的系统误差(即组分温度整体偏高或者偏低, 而不是一个高于实际值, 而另一个偏低的情况, 用“最佳波长”处的普朗克函数进行反演, 则误差仍有可能达 0.5K 以上。

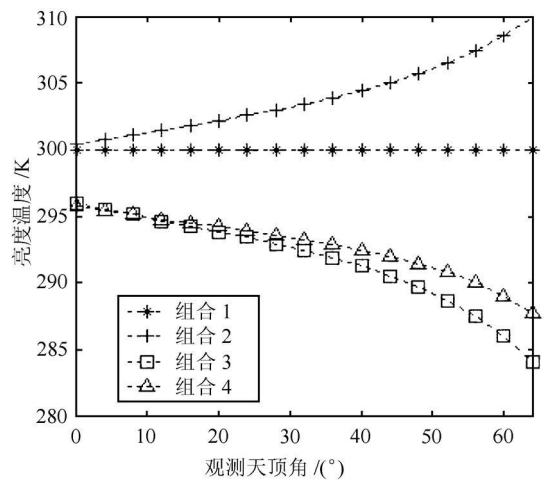


图 6 模拟的 V 型谷的不同温度和比辐射率组合的热辐射方向性
Fig. 6 Simulated directional brightness temperature for V shaped valley for AMTIS band

表 3 从 V 型谷反演的组分温度

Table 3 Component temperature retrieval from V shaped valley

组 合	设置值				反演后(用公式(5))		反演后(最佳波长)		响应函数峰值波长(8.8 μm)	
	ϵ_l	T_l	ϵ_r	T_r	T_l	T_r	T_l	T_r	T_l	T_r
1	1.0	300	1.0	300	300.0227	300.0227	300.0227	300.0227	300.0227	300.0227
2	1.0	310	1.0	290	310.0476	289.9728	310.0632	290.1550	310.0366	289.7805
3	0.9	290	0.95	310	289.9728	310.0476	290.3217	310.4584	289.0418	309.3618
4	0.96	290	0.9	310	289.9728	310.0476	290.1102	310.5979	289.6119	309.0032
5	0.98	296	0.94	307	296.0034	307.0451	296.0762	307.3329	295.8257	306.4742
6	0.9	280	1.0	320	279.9432	320.0118	280.3214	320.7113	278.9370	319.2179

注: 组合 5、6 没有在图 6 中绘出。

第二个例子:将李小文热红外概念模型用于宽波段情况下的模拟与反演^[8]。李小文推导概念模型时是基于光谱的普朗克函数的:

$$L_{\lambda}(\mu, T_0) = \epsilon_{\lambda, BRDF} B_{\lambda}(T_0) + \sum_i f_i(\mu) \epsilon_i \Delta T_i K_{\lambda}(T_0) B_{\lambda}(T_0) \quad (12)$$

将其用于宽波段时需要积分。阎广建等在不考虑通道响应函数的时候将其应用于宽波段的情况^[16]。假定用普朗克函数波段加权平均的比辐射率带来的误差可以接受,则有:

$$L_i(\mu, T_0) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [\epsilon_{\lambda, BRDF} B_{\lambda}(T_0) + \sum_i f_i(\mu) \epsilon_i \Delta T_i K_{\lambda}(T_0) B_{\lambda}(T_0)] S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) d\lambda} = \bar{\epsilon}_{BRDF} B'(T_0) + \sum_i f_i(\mu) \bar{\epsilon}_i \Delta T_i \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_{\lambda}(T_0) B_{\lambda}(T_0) S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) d\lambda} \quad (13)$$

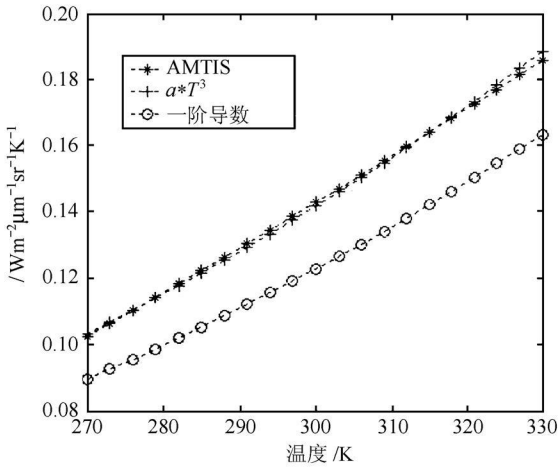


图7 对 LSF 模型最后积分项的拟合

Fig.7 Fit result for the last term of LSF model

需要解决公式最后一项中的积分问题。类似前一节的讨论,仍然可以通过拟合一个合适的关系式来表述。可以推断,这个积分用 T 的三次方,也就是 $B'(T_0)$ 的一阶导数来拟合较好。另外:若模仿李小文文章中的建模思路,直接用 $B'(T_0)$ 来建模,则是否

表4 对 LSF 模型最后一项积分的拟合

Table 4 Fit result for the last term of LSF model

模型	a	b	SSE	R-square	RMSE
$Y = ax + b$	0.00139	-0.2738	3.721×10^{-6}	0.9997	0.0004425
$Y = ax^3$	5.245×10^{-9}	/	2.603×10^{-5}	0.9981	0.001141
$Y^* = ax^3$	4.544×10^{-9}	/	0.0080	0.9986	0.0195

Y^* 表示直接从 $B_i(T) = ax^4 + b$ 求导而来。第二行和第三行的曲线几乎平行。

可以直接用 $B'(T_0)$ 的一阶导数直数代替(13)中最后一项中的积分呢(即 $a * T^3$ 的形式)? 拟合结果见图7和表4。拟合结果用线性的最好,有两个参数;用三次方则仅仅需要一个参数,精度略差(第二行)。第三行是用原始的 $B(T_0)$ 求一阶导数得到的,它和前两行的结果相差20%左右。

图8给出了根据概念模型模拟的由土壤和植被组成的混合像元组成的热辐射方向性。土壤比辐射率恒为0.94,温度(T_s)为307K;植被的恒为0.98,温度(T_v)为296K,参考温度 $T_0 = 300K$ 。假定由整个像元 BRDF 决定的比辐射率(忽略植被和土壤间的多次散射)为:

$$\epsilon_{BRDF} = a_s(\mu) \epsilon_s + a_v(\mu) \epsilon_v \quad (14)$$

假定冠层叶倾角分布为球形, LAI 取不同的值,则在 μ 方向顶层的间隙率为:

$$a_s(\mu) = \exp(-g(\mu) LAI / \mu) \quad (15)$$

其中 $g(\mu)$ 对于当前的情况取为0.5。

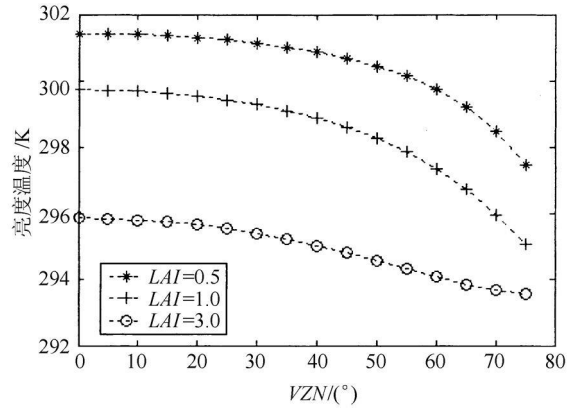


图8 模拟的由土壤和植被组成的混合像元的热辐射方向性

Fig.8 Simulated directional brightness temperature for LSF model at AMTIS band

表5给出了反演的结果。由于这个例子中给定的土壤和植被的温差比较小,3种情况下反演的误差都不大,但仍以第一种情况为最好,采用宽波段的拟合公式可以非常准确的反演组分温度。

表 5 从图 8 数据进行反演

Table 5 Component temperatures retrieval from data of Fig.8

LAI	宽波段拟合公式		最佳波长(10.8798 μ m)		最大响应(8.8 μ m)	
	T_v	T_s	T_v	T_s	T_v	T_s
0.5	295.9875	307.0800	295.8170	307.0355	296.2224	306.8923
1.0	295.9875	307.0800	295.8061	307.0461	296.2345	306.8806
3.0	295.9875	307.0800	295.7996	307.0692	296.2424	306.8521

5 讨论与结论

从第 3 节的讨论可以看出,对于比辐射率随波长变化如图 3 的情况下,将波段平均的比辐射率用于组分温度反演是可以满足定量遥感需要的,其误差取决于比辐射率的形状和计算波段平均比辐射率时的温度大小。类似地,若考虑大气影响,特别是大气透过率在波段范围内的不均一带来的误差同比辐射率的波段不均匀类似,误差大小与窗口区的透过率变化密切相关^[19],限于篇幅,此处不再作进一步的讨论。

对于通道响应函数的影响:表 1 给出了拟合 AMTIS 亮度温度与辐射亮度关系不同形式等式的结果。作为在参数个数与精度之间的均衡,用公式(5)的形式是最好的。

从第 4 节的模拟可以看出,对于 AMTIS,用公式(5)来进行组分温度反演是最合适的;用根据拟合的“差的方差”最小原则得到的“最佳波长”处的普朗克函数来进行组分温度反演,误差相对较小。用这个波长应该引起组分温度反演的系统误差(即组分温度整体偏高或者偏低,而不是一个高于实际值,而另一个偏低的情况)。

本文最后给出了李小文概念模型的宽波段形式;从宽波段形式的概念模型可以进行准确的组分温度反演。

参考文献(References)

[1] Li X W, Wang J F, Wang J D, et al. Multi-angle and Thermal Infrared Remote Sensing[M]. Beijing: Science Press, 2001. [李小文, 汪骏发, 王锦地等. 多角度与热红外对地观测[M]. 北京: 科学出版社, 2001.]

[2] Yan G J, Jiang L M, Wang J D, et al. Row Crop Radiometric Bidirectional Fractional Model and Its Validation[J]. *Science in China*. Series D, 2002, **32**(10): 857—863. [阎广建, 蒋玲梅, 王锦地等. 行播作物热辐射双向间隙率模型及验证[J]. 中国科学 D 辑, 2002, **32**(10): 857—863.]

[3] Chen L F, Liu Q H, Fan W J, et al. Row Crop Radiometric Directional Fractional Model [J]. *Science in China*, Series D, 2002, **32**(4): 290—298. [陈良富, 柳钦火, 范闻捷等. 行播作物热辐射方向性孔隙率模型[J]. 中国科学 D 辑, 2002, **32**(4): 290—298.]

[4] Ronald E. Alley, Marit Jentoft-Nilsen. ASTER ATBD: Algorithm Theoretical Basis Document for Brightness Temperature [R]. Version 3.0, 1999.

[5] Kimes D S, Kirchner JA. Directional Radiometric Measurements of Row-crop Temperatures [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1983, **4**: 299—311.

[6] Kimes D S, Idso S B, Pinter PJ Jr, et al. View Angle Effects in the Radiometric Measurements of Plant Canopy Temperatures [J]. *Remote Sensing Environ.*, 1980, **10**: 273—284.

[7] Kimes D S. Effects of Vegetation Canopy Structure on Remotely Sensed Canopy Temperatures [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1980, **10**: 165—174.

[8] Richter R, Schläpfer D. Geo-atmospheric Processing of Airborne Imaging Spectrometry Data. Part 2 Atmospheric/Topographic Correction [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 2002, **23**: 2631—2649.

[9] Singh S M. Brightness Temperature Algorithms for Landsat Thematic Mapper Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, **24**: 509—512.

[10] Becker F, Li Z L. Temperature-independent Spectral Indices in Thermal Infrared Bands [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1990, **32**: 17—33.

[11] Wukelic G E, Gibbons D E, Martucci L M, et al. Radiometric Calibration of Landsat Thematic Mapper Thermal Band [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, **28**: 339—347.

[12] Xiao Q. Quantitative Research for Airborne Remote Sensed Data [D]. Chinese Academy of Sciences, 2002. [肖青. 机载遥感数据的定量化研究, 中国科学院遥感应用研究所博士论文, 2002]

[13] Richter R, Coll C. Bandpass-resampling Effects for the Retrieval of Surface Emissivity [J]. *Applied Optics*, 2002, **41**: 3523—3529.

[14] Salisbury J W, D'Aria D M. Emissivity of Terrestrial Materials in the 8-14 μ m Atmospheric Window [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, **42**: 83—106.

[15] Kenta Ogawa, Thomas Schmugge, Frederic Jacob, et al. Estimation of Land Surface Window (8-12 μ m) Emissivity from Multispectral Thermal Infrared Remote Sensing: A Case Study in a Part of Sahara Desert [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(2): 1067.

[16] Yan G J, Li X W, Wang J D, et al. Modeling Directional Effects of Thermal Emission in Wide Band Measurements [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, **4**(3): 198—193. [阎广建, 李小文, 王锦地等. 宽

- 波段热红外方向性辐射建模[J]. 遥感学报, 2000, 4(3): 189—193.]
- [17] Deng M D, Yin J Y, Liu X Y *et al* . Integral Solution of the Form of the Blackbody Radiation and Its Application[J]. *Remote Sensing Information*, 2002 (1): 2—10 [邓明德, 尹京苑, 刘西坦等. 黑体辐射公式的积分解及应用[J]. 遥感信息, 2002 (1): 2—10.]
- [18] Li X W, 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.
- [19] Rudolf Richter . Bandpass-resampling Effects on the Retrieval of Radiance and Surface Reflectance [J]. *Applied Optics*, 2000, 39 (27): 5001—5005.

Band Response Function and Emissivity Effect on Component Temperatures Retrieval for Wide Band Thermal-infrared Sensor

HE Li-ming^{1,2}, YAN Guang-jian¹, WANG Hua¹, LI Xiao-wen^{1,3}

(1. State key Laboratory of Remote Sensing Science, Research Center for Remote Sensing & GIS, School of Geography & Remote Sensing, Beijing Normal Univ., Beijing 100875, China

2. Environmental Satellite Centre Preparing Office, State Environmental Protection Administration, Beijing 100029, China;

3. Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: It is not always suitable to use Planck's law or Stefan-Boltzmann's law to describe the relation between brightness temperature and radiance for a wide band sensor. But given a Planck's law weighted and band averaged emissivity and an empirical fit equation between brightness temperature and radiance, it is still very feasible to retrieve component temperatures from multi-angle data. In this paper, different equations to fit brightness temperature and radiance for AMTIS (Airborne Multi-angle TIR/NIR Imaging System) are analyzed; the first approach is to use the Stefan-Boltzmann's law, and a compact equation including a T^4 term is found to be very effective; the second approach is to fit an appropriate wavelength using Planck's law. The component temperature retrieval errors due to the band average of emissivity is also analyzed.

Key words: wide band; TIR; component temperature; error; band response function; emissivity