

文章编号: 1007-4619 (2002) 03-0161-07

利用 ATSR-2 数据提取地表组分温度

何立明¹, 阎广建¹, 王锦地¹, 李小文^{1,2}

(1. 北京师范大学遥感与 GIS 研究中心, 北京 100875;

2. Center for Remote Sensing, Dept. of Geography, Boston University
675 Commonwealth Avenue, Boston, MA 02215, USA)

摘要: 发展了一种迭代算法,能够利用 ATSR-2 双角观测同时进行大气校正和反演地表的组分(植被和土壤)温度。在算法中,全球通用二次方(QUAD)算法用于进行大气校正,LSF 模型用于计算等效方向发射率,通过迭代的方法,同时反演地表组分温度和进行大气校正。结果表明,在可接受的范围内,土壤温度和植被温度可以被分离出来,而且,反演出的两个方向发射率的差和经过大气校正后的两个方向亮温的差有很好的相关性。更进一步的敏感性和不确定性分析表明,如果利用 USM 进行分阶段反演,可以得到更好的结果。

关键词: ATSR 数据;LSF 模型;QUAD 算法;组分温度

中图分类号: TP702 **文献标识码:** A

1 引言

陆地表面温度(Land Surface Temperature, LST)是区域和全球尺度陆地表层物理过程中的一个关键参量,广泛应用于气候学、水文学、生态学等的研究^[1]。从 20 世纪 60 年代起,卫星遥感数据就用来提取地表温度^[2]。利用卫星遥感数据提取海洋温度(Sea Surface Temperature, SST)的研究已较为成熟,可以在全球范围内达到 1K 的精度。但是当人们把推导 SST 的算法用于求解陆地表面温度时,遇到了海洋上没有的情况,其不确定性因素主要是陆地表面材料和结构的差异造成的陆面发射率的不均匀性。

海洋表面可近似认为是均匀、同温的。对于均匀、同温的物体表面,普朗克定律是温度和波长的普适函数。然而,实际的陆地表面几乎没有理想的均匀、同温物体,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。为了从理论上描述不均匀、不同温地表的方向性辐射,李小文等人提出了一个概念模型,在此模型中,强调在遥感像元尺度上通常地表不再是同温物体,同时构造了像元等效发射

率,这个等效发射率一部分是由地表的二向性反射分布函数决定,另一部分是由组分温度的差别引起的发射率的增(减)量,我们这里简称此模型为 LSF (Li-Strahler-Friedl, LSF) 模型^[3]。LSF 模型为不同温地表热辐射的方向性建模奠定了基础,经适当扩展可适用于不同的地物。但是,利用 LSF 模型计算方向发射率需要知道的是没有大气影响的地表的热辐射,要利用 LSF 模型,卫星遥感数据必须经过大气校正。

目前,热红外遥感领域里较为成熟的大气校正方法是分窗算法^[4,5],但是基本上都是针对单一的观测角度。如果应用到多角度的热红外观测时,所面临的主要困难就是不同角度的发射率是不一样的,也即热辐射的方向性问题。比如 Kimes 测得一个 3 层植被从天顶到接近水平观测方向时的等效辐射温度有 2K 的差别^[6],对于雪地,不考虑这种各向异性将导致 3K 的误差^[7],Balick 和 Hutchinson 更观测到落叶林的方向辐射温差可达 7K^[8]。多个角度的观测虽然增加了大气校正的复杂性,却增加了更多的方向性信息,使得从中提取地表的组分温度成为可能。相比整个像元 1K 的 LSF 估算精度,不同组分(比如植被与土壤)温度 2—3K 的精度可能更具

收稿日期: 2001-01-02; 修订日期: 2001-05-22

基金项目: 国家九五攀登预选项目(编号:95-Y-38),国家重点基础研究发展规划项目(编号:2000G77900),美国 NASA(编号:NAG5-7217),高等学校骨干教师资助计划,中国博士后科学基金资助项目资助

作者简介: 何立明(1977—),男,1999年7月毕业于烟台师范学院地理系,现在北京师范大学资源与环境科学系遥感中心攻读硕士学位,从事地表组分温度反演和大气订正工作,已发表论文1篇。

有实际意义。本文利用一个典型的全球二次方 (QUAD) 分窗算法^[9], 结合 LSF 模型同时反演地表组分温度和计算等效方向发射率。结果表明, 在可接受的范围内, 土壤温度和植被温度是可以被分离的。

2 数据收集与分析

欧洲遥感卫星上的沿轨扫描辐射计 (Along Track Scanning Radiometer, ATSR-2) 能提供全球 7 个通道、两个方向的遥感图像, 是为数不多的包含多角度的可见光、近红外和热红外遥感信息的遥感数据。其天顶 (其实为近似天顶方向, 此处简称为天顶, 下同) 观测的分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$, 前向观测的分辨率为 $1.5\text{km} \times 2\text{km}$, 经重采样后两个方向的分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 。7 个的通道的中心波长分别为 0.55, 0.65, 0.87, 1.6, 3.7, 11, $12\mu\text{m}$ 。两个方向 (天顶和前向) 的观测天顶角大约为 0° 和 55° 。

这里, 我们利用 ATSR-2 的格网亮度温度/反射率产品 (Gridded Brightness Temperature/Reflectance Product, GBT) 进行组分温度提取方法的研究。其中可见光、近红外的波段用来计算 NDVI 和 MSAVI (Modified Soil adjusted Vegetation Index), 结合两个热红外波段用来提取地表的组分温度。

图像获取时间是 1999-4-25 11:14-11:15 (北京时间), 经度范围约为 $111^\circ-117^\circ\text{E}$, 纬度范围约为 $31^\circ-36^\circ\text{N}$, 图像大部分位于山东省西部和河南省东部, 地形为海拔 200m 以下的平原。依据当地的种植习惯, 地表的作物一般为冬小麦。

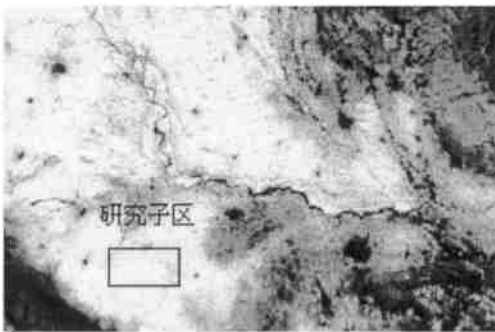


图 1 所选区域天顶观测 NDVI 图 (NDVI 越大, 像元越亮)

Fig. 1 The NDVI image at nadir view of the study area

我们选取了离黄河不远的—个子区为研究对象 (图 1)。子区的大小为 13×21 像元, 经纬度的中心坐标为 114.8°N , 34.3°E 。两个方向的成像时间相差不到 2min, 观测时太阳天顶角相差不大, 大约为 26° ; 两个方向观测时的太阳方位角相差不大, 约

为 $137^\circ-138^\circ$; 图像上天顶方向的观测方位角以 14° 为中心, 变化较大; 前向观测的方位角约为 $11^\circ-14^\circ$ 。所选子区地表状况均一, NDVI 的值多在 0.5-0.6 之间。

ATSR-2 产品没有经过大气校正, 对于可见光和近红外通道, 我们进行了如下考虑。首先, 对两个方向的 NDVI 进行了对比, 发现天顶方向的 NDVI 大于前向观测的 NDVI。一般情况下, 对于植被而言, 由于其可见光、近红外波段都有热点, 所以其二向性 NDVI ($BiNDVI$) 的热点部分消掉, 甚至由于植被红波段的热点的形状比近红外的热点更尖锐, 植被的 $BiNDVI$ 有可能出现一个微弱的负“热点”。另外, 由于植被在近红外波段的多次散射强, 其 $BiNDVI$ 呈较强的“碗边”, 即在大的观测角或太阳天顶角时, $BiNDVI$ 倾向于增加^[10]。因此, 对 ATSR-2 数据而言, 在我们的研究区域内, 其前向的 NDVI 应比天顶方向的要大。ATSR 两个角度的数据几乎是同时获取的, 我们认为地表反射没有变化, NDVI 的这种情况主要是大气所造成的影响。另外, 由于前向观测有更长的大气路径长度, 因而地物的 BRDF 受到的衰减也更大; 同时, 其相应的大气程辐射也更大。通过选取适当的大气程辐射模型和暗目标及亮目标, 利用两个方向大气程辐射的差异, 就可以拟合出大气光学厚度和大气程辐射等各项参数, 来作初步的大气校正, 这里本文不再详述。

我们将两个热红外通道间的亮温的差值做成直方图 (图 2)。可以看到两个通道间 ($T_{11} - T_{12}$) 有 2-3K 的温差, 而且前向观测两个通道间的差值更大。这一差值很难用两个通道间的反射率的差异来解释。因为 1% 的反射率差异可以导致 0.5K 的地面亮温的差, 但是在 ATSR 卫星 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 分辨率尺度上, 地面上两个相邻通道间的反射率的差别是非常小的, 而且通常是 $11\mu\text{m}$ 通道的小于 $12\mu\text{m}$ 通道的 (差值最大为 1%)^[11]。这里, 我们将两个通道间亮温的差异由热辐射受到水汽吸收不同来解释。因而, 热红外通道的数据需要大气校正。

另外, 对图 1 中的黑框区域, 我们利用两个方向 NDVI 的差 ($\Delta NDVI = NDVI_n - NDVI_f$) 同两个方向亮度温度的差 ($\Delta T = T_{11_n} - T_{11_f}$) 做散点图, 可以看到两者呈明显的负相关 (图 3), 由此可见不同方向间的观测包含丰富的信息。

3 QUAD 分窗算法

这里, 我们利用 Francois 的通用二次方方法 (QUAD)

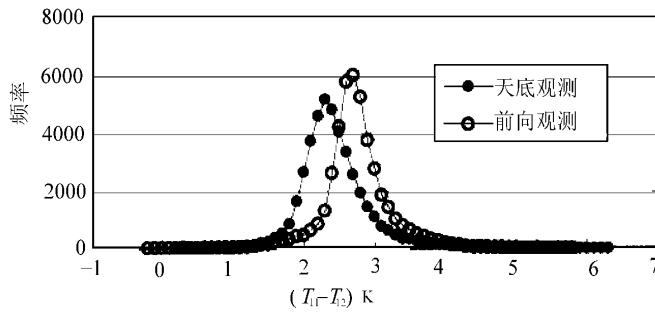


图 2 热红外两通道间亮温的差异

Fig. 2 Channel difference between brightness temperatures

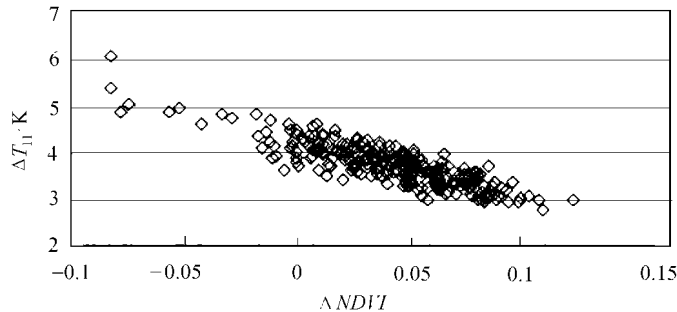


图 3 两个方向 NDVI 差与两方向亮温差散点图

Fig. 3 Relationship between NDVI and brightness temperature

进行热红外通道的大气校正^[9]。

FranCois 和 Otte 基于 1761 组不同的大气探空数据(TIGR 数据集),采用逐线辐射传输模型 4A,对经典的分窗公式进行分析,得出经典分窗公式关于两通道的有效大气温度相等的假设是不合理的。由此,在假定 AVHRR 的通道 4,5 的发射率相等,且变化范围为 0.90-1.00 的情况下,利用这 1761 种大气探空数据,经回归分析,建立了两种不同的分窗算法,即通用二次方方法(QUAD)和水汽有关分窗(WVD)公式,前者的系数可应用于全球范围,其二次方项是对水汽含量的粗略考虑,这种算法适合于发射率较高(0.95 以上)和水汽量较小的情况。在水汽含量未知的情况下,将 QUAD 算法应用于实际的 SST 数据,可达到-0.1-0.4K 的精度。

QUAD 算法的表达式是:

$$T_s = T_{b11} + a(T_{b11} - T_{b12}) + b(T_{b11} - T_{b12})^2 + c \quad (1)$$

其中 T_s 为地表的亮度温度, T_{b11} 和 T_{b12} 分别为卫星在 11 μ m 和 12 μ m 波段测得的亮度温度, a, b, c 为根据不同的发射率给出的回归系数。

QUAD 算法的优点是根据不同的发射率给出了不同的回归系数,从而可适合于不同发射率的地表。

但前提是要知道地表的发射率,而且 QUAD 算法没有考虑到地表的发射率随方向的变化。因而它的不确定性仍然是发射率问题。为此,在大气校正中引入 LSF 模型。

4 LSF 模型概述

为了从理论上描述不均匀、不同温地表的方向性辐射,李小文等人提出了一个概念模型(LSF 模型)^[3],在此模型中,地表不再是同温的物体,同时构造了等效发射率,这个等效发射率一部分是由地表的二向性反射分布函数决定,另一部分是由组分温度的差别引起的发射率的增(减)量。用 LSF 模型描述地表的辐射率为:

$$L_\lambda(\mu, T_0) = [\epsilon_{BRDF} + \Delta\epsilon_{GO}(T | T_0)] B_\lambda(T_0) \quad (2)$$

其中 μ 表示观测方向, T_0 表示参考温度,它可以是一个假想的像元平均温度,也可以根据具体的应用需要定义, $B_\lambda(T_0)$ 为在参考温度 T_0 时黑体的辐射率, ϵ_{BRDF} 为由像元 BRDF 决定的发射率,其中包含了多次散射的影响, $\Delta\epsilon_{GO}(T | T_0)$ 为由传感器视场内 3-D 结构和温差所造成的方向发射率的差异,其表达

式为:

$$\Delta \epsilon_{GO}(T | T_0) = K_{\lambda}(T_0) \sum_i f_i(\mu) \epsilon_i \Delta T_i \quad (3)$$

式中 $f_i(\mu)$ 表示 μ 方向组分 i 在传感器视场内所占的比例, ϵ_i 表示组分 i 的发射率, ΔT_i 是组分温度同参考温度 T_0 的差。 $K_{\lambda}(T_0)$ 是 λ 和 T_0 的函数:

$$K_{\lambda}(T_0) = \frac{D_{\lambda} e^{D_{\lambda}/T_0}}{T_0^2 (e^{D_{\lambda}/T_0} - 1)} \quad (4)$$

这里 D_{λ} 是波长的函数,

$$D_{\lambda} = \frac{1.439 \times 10^4}{\lambda} \quad (5)$$

由(2)可见,LSF 模型从理论上提供了计算地表像元方向性发射率的途径。这将对多角度遥感的温度反演起到关键的作用。

5 基于模型的组分温度分离算法

从上面的分析可以看出,在一个卫星像元内,只要知道了 ϵ_{BRDF} 、各组分在观测方向的比例、组分发射率和组分温度,在给定的参考温度下,根据 LSF 模型就可以计算出像元的等效方向发射率。根据得到的等效方向发射率,就可以利用 QUAD 算法对热红外两个通道的亮度温度进行大气校正,得到像元表面的亮度温度。把此温度与用 LSF 模型的计算结果相拟合,采用迭代的方式,就可以将大气校正和组分温度反演结合起来进行。

具体步骤如下:

- (1) 给定两个方向初始的像元组分温度和组分发射率;
- (2) 利用 LSF 模型计算像元的等效方向发射率;
- (3) 根据得到的等效方向发射率利用 QUAD 算法进行大气校正;
- (4) 把 LSF 模型与大气校正后的地表热辐射相拟合;
- (5) 重复(1)–(4)步,得到最小的拟合误差。

这样,最后就得到像元的组分温度和方向发射率。

在应用 LSF 模型时,需要对像元中每一组分所占的比率及 ϵ_{BRDF} 作进一步考虑。这里,我们假设模型中地面由土壤和植被两种均匀、同温的组分组成,组分温度分别为 T_s 和 T_v ,二者之间存在多次散射。这样,从传感器视场中看到的就是土壤和植被热发射的加权和。其中的关键就是间隙率。

要得到间隙率,一般需要得到叶倾角分布等植被参数,这在一般的卫星遥感中是难以做的。ATSR-2 能提供两个方向可见光、近红外通道的观测,根据 Baret 等人的研究^[12],间隙率可以根据红、近红外波段的反射得到:

$$f_l(\mu) = \left[\frac{VI(\mu) - VI_{\infty}}{VI_s - VI_{\infty}} \right]^K \quad (6)$$

这里 VI_s 和 VI_{∞} 分别为 $LAI=0$ (土壤)和植被冠层为无穷深时的植被指数,指数 K 主要依赖于冠层结构、太阳和观测方向及叶的光学属性, $VI(\mu)$ 为观测方向的植被指数。公式(6)中,根据选取的植被指数, VI_s 、 VI_{∞} 和 K 取不同的值。

$VI(\mu)$ 的选取以修正的土壤调节植被指数 (Modified Soil Adjusted Vegetation Index, MSAVI) 为最好^[13],因为它有一个自调节的 L 函数。 L 函数的利用不仅增加了植被的动态响应范围,而且进一步减轻了土壤背景变化的影响。其一般公式形式如下:

$$MSAVI = \frac{1}{2} \left[2\rho_{NR} + 1 - \sqrt{(2\rho_{NR} + 1)^2 - 8(\rho_{NR} - \rho_R)} \right] \quad (7)$$

相应的,这里取 $VI_s=0.102$, $VI_{\infty}=0.894$, $K=1.058$ 。

我们根据(6)式和(7)式计算了间隙率,通过检查研究区域的最大的间隙率,发现天顶和前向各自最大的间隙率为 1.05 和 1.2,最小的为 0.5 和 0.57。冬小麦的叶倾角分布为喜直型,一般情况下天顶方向的间隙率比前向的间隙率要大,由于间隙率是采用可见光、近红外波段的数据作出的,光学波段的大气校正结果并不是很理想,程辐射的影响没有完全消除。根据我们前面的假设,对于均匀植被冠层,所有方向的间隙率都应该小于等于 1 且大于等于 0,因此,在计算时我们将天顶和前向的间隙率各减去 0.05 和 0.2,作为修正后的间隙率,又保证了不会出现间隙率小于 0 的情况。

基于 LSF 模型^[3],将地表的 ϵ_{BRDF} 表达为两部分,即土壤和植被冠层发射率的加权和:

$$\epsilon_{BRDF} = f_1(\mu) \epsilon_1 + f_2(\mu) \epsilon_2 \quad (8)$$

其中, ϵ_1 , ϵ_2 分别为植被冠层和土壤的发射率, $f_1(\mu)$, $f_2(\mu)$ 分别为 μ 方向植被覆盖度及间隙率。可以看出,在小麦生长的早期,间隙率相对比较大,土壤在整个发射率的体系中占的比重相对较大,而到后期,小麦的间隙率迅速变小,此时,植被冠层的发射率占主导地位。

根据基尔霍夫定律,植被冠层的发射率可以由方向半球反射率得到。根据我们前面的假设,对于

一个均匀的半无限深植被冠层,假设冠层具有同温的叶面、球形叶倾角分布,叶面的朗伯反射率为 0.04(对热辐射不透明),则单个叶面的发射率为 0.96,由 Hapke 的公式^[14],半无限植被冠层的方向半球反射率可写为:

$$r(\mu) = (1 - \gamma)/(1 + 2\gamma\mu) + 0.25\rho\mu/(1 + 2\mu) \quad (9)$$

其中: μ 为入射天顶角的余弦, $\gamma = \sqrt{1 - \rho}$, ρ 为叶面的朗伯反射率。

这样就可以得到冠层的发射率 ϵ_1 :

$$\epsilon_1 = 1 - r(\mu) \quad (10)$$

同时,由式(3)得:

$$\Delta\epsilon_{CO}(T | T_0) = (f_2(\mu) \epsilon_2 \Delta T_2 - f_1(\mu) \epsilon_1 \Delta T_1) K_\lambda(T_0) \quad (11)$$

其中: $\Delta T_1 = T_0 - T_v$, $\Delta T_2 = T_s - T_0$, T_0 为参考温度,上式中 $\Delta\epsilon_{CO}$ 中两个未知量 T_s , T_v 是待反演的土壤和植被的温度。

利用上面的算法得到的结果如图 4,从图 4 中可以看出尽管反演出的土壤和植被的温度具有很大的变化范围,但是组分温度还是被明显地分离开来。

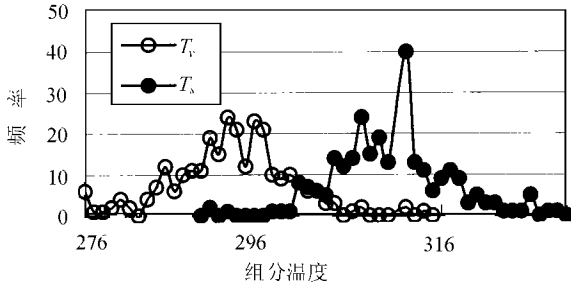


图 4 土壤和植被温度反演结果

Fig. 4 Retrieved temperatures of vegetation (T_v) and soil (T_s)

图 5 为研究子区(图 1 中黑框内)在给定参考温度下两个方向的亮温的差和发射率的差别。其中, $\epsilon_n - \epsilon_f$ 表示两个方向方向发射率的差, $T_n - T_f$ 表示

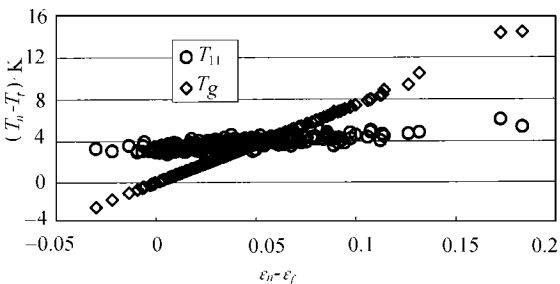


图 5 两方向亮温差同比发射率差相关图

Fig. 5 Relationship between the difference of effective emissivity and the difference of brightness temperature

两个方向亮度温度的差, T_g 表示经过大气校正后的地面的亮温, T_{11} 表示 11 μ m 通道卫星的测量值。可以看到经过大气校正后,两个方向亮度温度的差和发射率的差有很好的线性关系。

6 反演参数的不确定性与敏感性分析

在反演中,对观测数据敏感的参数,被成功反演的可能性大。所以,应尽可能利用对参数变化敏感的数据来反演。另一方面,如果我们对地表或多或少有一点先验知识的积累,在反演时就不不仅要考虑参数的敏感性,还要考虑参数的不确定性,即尽可能把有限的信息用到对最不确定的参数的反演上。然而,将敏感性和不确定性以定量的方式同时考虑是比较困难的。根据我们前面的工作^[15],这里,用敏感性和不确定性矩阵(uncertainty and sensitivity matrix, USM)来描述:

$$USM[i][j] = \text{Maxdiff}[R(j | i)]/R(i) \quad (12)$$

这里, $\text{Maxdiff}[R(j | i)]$ 是在它的先验不确定性范围内第 i 个观测方向第 j 个参数的模型预测值的最大差值, $R(i)$ 是所有参数为最佳预测值时第 i 个观测方向的模型计算值。

我们给定 T_s 和 T_v 的不确定范围为 80K 和 40K,取反演结果的中值作为它们的最佳预测值(图 4)。对 11 μ m 通道 USM 的值为表 1。

表 1 组分温度的 USM

Table 1 USM of component temperatures

	最佳预测值/K	USM	
		天顶	前向
植被	293	0.23	0.32
土壤	309	0.71	0.54

从表 1 可以看出对于植被温度来说前向观测比天顶观测要敏感。而土壤温度却恰好相反。这与文献[11]中的结论是一致的,而我们给出了既考虑了参数的敏感性、又考虑了其不确定性的定量表达。根据文献[16],我们采用基于 USM 的组分温度反演策略。首先,用最敏感的样本(天顶观测)去反演最不确定的参数 T_s ,接着,用前向观测数据反演 T_v 。这是一个迭代过程,直到 T_s 和 T_v 收敛到预定的精度为止(结果如图 6)。同图 4 相比较可以看出,如果我们用最敏感的样本去反演最不确定的参数,比用所有的样本去反演所有的参数结果要稳定得多。

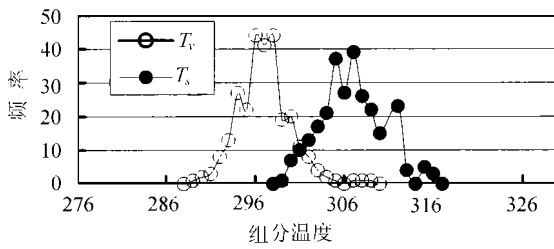


图 6 用 USM 反演的组分温度

Fig. 6 Retrieved temperatures of vegetation (T_v) and soil (T_s)

7 结 论

ATSR 的准实时热红外方向观测数据为研究从多角度数据提取地表温度信息提供了难得的机会,但是它的热红外数据两个通道间的差异说明大气的影 响是不能忽略的。分窗算法如 QUAD 可以进行大气校正,但是它的限制因素是地表发射率的不确定性,LSF 模型可以从理论上计算地表的方向发射率,但是却需要大气校正后的地表的热辐射。本文利用基于模型的算法同时进行大气校正和地表组分温度的反演。通过迭代,像元的组分温度和方向等效发射率被同时计算出来。可以看到,两个方向发射率的差同经过分窗算法校正后两个方向亮度温度的差之间有很好的线性关系。虽然最后反演出的组分温度有较大的变化范围,但是组分温度分离的趋势是很显然的。从对两个组分温度的不确定性和敏感性分析可以看出,如果最敏感的样本被用于反演中,结果会更为稳定。

致 谢 本文所用的数据由欧空局 (ERS-AO3.142 项目) 提供;感谢 Mr. Nora Wiik 在数据前期处理中的大力帮助;感谢与苏理宏博士和刘强博士富有成效的讨论。

参 考 文 献 (References)

- [1] Hatfield J L, Reginato R J, Idso S B. Evaluation of Canopy Temperature-Evapotranspiration Models over Various Crops [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 1984, **32**:41-53.
- [2] Wark K Q, Yamamoto Y, Lienesch J H. Methods of Estimating Infrared Flux and Surface Temperature from Meteorological Satellites

- [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1962, **19**:369-384.
- [3] Li X, Strahler A. H, Friedl M A. A Conceptual Model For Effective Directional Emissivity from Nonisothermal Surfaces [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2000, **37**(5):2508-2517.
- [4] Becker F, Li Z-L. Toward a Local Split Window Method over Land Surface [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 1990, **11**(3):369-393.
- [5] Wan Z, Kozier J. A Generalized Split-window Algorithm for Retrieving Land-surface Temperature from Space [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1997, **35**(4):980-996.
- [6] Kimes D S, J A Smith, Lin L E. Thermal IR Existence Model of a Plant Canopy [J]. *App. Optics*, 1981, **20**(4):623-632.
- [7] Dozier J, Warren S G. Effect of Viewing Angle on the Infrared Brightness Temperature of Snow [J]. *Water Resour. Res.*, 1982, **18**(5):1424-1434.
- [8] Balick L, Hutchinson B. Directional Thermal Infrared Exitance Distributions from a Leafless Deciduous Forest [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1995, **GE-24**(5):693-698.
- [9] Francois C, Ottlé C. Atmospheric Correction in the Thermal Infrared: Global and Water Vapor Dependent Split-window Algorithms Applications to ATSR and AVHRR Data [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1996, **34**(2):457-470.
- [10] Li X, Gao F, Wang J, et al. Bidirectional NDVI: Concept and Application [J]. Submitted to Progress in Natural Sciences [J]. [李小文,高峰,王锦地等. 二向性归一化植被指数:概念及应用 [J]. 投稿自然科学进展.]
- [11] Li Z, Stoll M P, Zhang R, et al. Research of the Decomposition of Soil and Vegetation Temperatures Using ATSR Data [J]. *Science in China*, 2000, **30**(suppl.):27-38. [李召良,Stoll M P,张仁华等. 利用 ATSR 数据分解土壤和植被温度的研究[J]. 中国科学 2000, **30**(增刊):27-38.]
- [12] Baret R J, Clevers G P W, Steven M D. The Robustness of Canopy Gap Fraction Estimates from Red and Near-infrared Reflectances: A Comparison of Approaches [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1995, **54**:141-151.
- [13] Qi J, Chehbouni A, R Huetu A, et al. A Modified Soil Adjusted Vegetation Index [J]. *Remote Sens., Environ.*, 1994, **48**:119-126.
- [14] Hapke B W. Bidirectional Reflectance Spectroscopy 1: theory [J]. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**:3039-3054.
- [15] Li X, GAO F, Wang J, et al. The Uncertainty and Sensitivity Matrix of Parameters in the Retrieval of Remote Sensing [J]. *J. Remote Sens.*, 1997, **1**(1):5-13. [李小文,高峰,王锦地等. 遥感反演中参数的不确定性与敏感性矩阵[J]. 遥感学报,1997, **1**(1):5-13.]
- [16] Yan G, Li X, Wang J et al. Modeling directional effects of thermal emission across broad band [J], *J. Remote Sens.*, 2000, **4**(3):189-193. [阎广建,李小文,王锦地等. 宽波段热红外方向性建模[J]. 遥感学报,2000, **4**(3):189-193.]

Retrieval of Land Surface Components Temperatures Using ATSR-2 Data

He Li-ming¹, Yan Guang-jian¹, Wang Jin-di¹, Li Xiao-wen^{1,2}

(1. Research Center for Remote Sensing and GIS, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Center for Remote Sensing, Dept. of Geography, Boston University 675 Commonwealth Avenue, Boston, MA 02215, USA)

Abstract: Precise retrieval of land surface temperature from satellite remotely sensed data need atmospheric correction and a known effective emissivity of the pixel. Various split-window algorithms have been used to solve the first problem, but they all need a known surface emissivity. LSF model can calculate the effective emissivity of the nonisothermal and heterogeneous pixel, but the data must be atmospherically corrected when using satellite images.

In this paper, we have developed a model-based algorithm that can correct the atmosphere effects and retrieve component temperatures using ATSR-2 dual-angle observation. In this algorithm, QUAD algorithm is used to perform atmospheric correction, and LSF model is used to calculate the directional effective emissivity, by iteration, atmospheric correction and component temperatures retrieval can be completed synchronously. Good linearity was found between the difference of the directional emissivity and the difference of the directional brightness temperature after atmospheric correction. Although the range of the retrieved component temperatures is large, it is still clear that the component temperatures of vegetation and soil are separated. Further analysis of the uncertainty and sensitivity for the two component temperatures show that if only the most sensitive sample is used in inversion, the results tend to be more robust.

Key words: ATSR data; LSF modal; QUAD algorithm; component temperatures