

针对 MODIS 影像的劈窗算法研究

毛克彪^{1,2,3} 覃志豪^{2,3} 施建成¹ 官 鹏¹

(1 中国科学院遥感应用研究所,北京市朝阳区大屯路,100101)

(2 国家农业部资源遥感与数字农业重点实验室,北京市中关村南大街,100081)

(3 南京大学国际地球系统科学研究所,南京市汉口路,210093)

摘要:在分析热红外遥感和现有的劈窗算法的理论基础上,针对 MODIS 数据对劈窗算法进行了推导。通过对热辐射强度和温度之间的关系计算,对 Planck 函数进行了线性简化,同时分析了 MODIS 的波段设置特点。MODIS 的近红外波段适宜于反演大气水汽含量,而大气透过率主要从 MODIS 的近红外波段数据反演得到大气水汽含量,并进而根据水汽含量与大气透过率的关系来进行估算。通过 MODIS 的可见光波段、近红外和中红外波段数据,完全可以获得地表温度反演所需要的基本参数,从而形成了针对 MODIS 数据的地表温度反演的劈窗算法。最后以环渤海地区为实验区,对本文提出的方法进行了实际应用分析。

关键词:LST; MODIS; 劈窗算法; 透过率

中图分类号:TP753;P237.3

地表能量交换信息的获取是监测区域资源环境变化的一个重要环节。地表温度是地表能量平衡的决定因素之一。因此,获取区域地表温度空间差异,并进而分析其对区域资源环境变化的影响,是区域资源环境动态监测的重要内容。

劈窗算法主要是针对 NOAA/AVHRR 的第 4、5 热红外波段提出来的^[1~5]。本文针对 MODIS 数据的特点,把用于 AVHRR 的劈窗算法改进成适合于 MODIS 数据的劈窗算法,特别是对 MODIS 的波段特征,对其参数进行了确定。

1 劈窗算法的理论基础

劈窗算法以地表热辐射传导方程为基础,通过对两个热红外通道的数据建立方程来反演地表温度。传导方程描述了卫星遥感所观测到的热辐射总强度,不仅有来自地表的热辐射成分,而且还有来自大气的向上和向下的热辐射成分。这些热辐射成分在穿过大气层到达传感器的过程中,还受到大气层的吸收作用的影响而减弱。同时,地表和大气的热辐射也在这一过程中产生不可忽略的影响。因此,地表温度的演算实际上是一个复

杂的求解问题。

为了定量地确定构成要素在地表温度反演过程中的相对作用,有必要引用黑体的辐射理论,明确热辐射与相应温度的关系。对于一个黑体,其辐射强度与温度和波长有直接关系,可用 Planck 辐射函数来表示:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (1)$$

式中, B_{λ} 是黑体光谱的发射率($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$); λ 是波长; k 是波尔兹曼常数; c 是光速。然后根据式(1)将地表温度 T_s 计算出来:

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln \left[\left(\frac{c_1}{\lambda^5 B_{\lambda}(T)} \right) + 1 \right]} \quad (2)$$

式中, c_1 、 c_2 为常数, $c_1 = hc^2$, $c_2 = hc/k$ 。黑体是一种理想物体,自然界中不存在这样的物体,大多数是灰体。因此,为了研究的方便,需要引进比辐射率的概念。比辐射率通常又称发射率,用 $\epsilon(T, \lambda)$ 表示。定义为物体在温度 T 、波长 λ 处的辐射出射度 $M_s(T, \lambda)$ 与同温度、同波长下的黑体辐射出射度 $M_b(T, \lambda)$ 的比值,即

$$\epsilon(T, \lambda) = \frac{M_s(T, \lambda)}{M_b(T, \lambda)} \quad (3)$$

比辐射率是一个比值,因此没有单位。 ϵ 取值在 0~1 之间,是波长 λ 的函数。许多学者在考虑不同大气的条件下,对辐射传输方程进行了不同的简化,从而形成了许多不同的温度反演算法。星上辐射值 $I_\lambda(T_\lambda)$ 在大气顶层可以表达如下^[6]:

$$I_\lambda(T_\lambda) = \epsilon_\lambda \tau_\lambda B_\lambda(T_s) - \int_0^{\tau_\lambda} d\tau'_\lambda \exp(-\tau'_\lambda) [B_\lambda(T_s) - B_\lambda(T_a(\tau_\lambda - \tau'_\lambda))] \quad (4)$$

式中, $B_\lambda(T_s)$ 为地物在 λ 波段的(假定为黑体)辐射率; τ'_λ 和 τ_λ 分别表示传感器高度和地面高度的光学厚度; ϵ_λ 为比辐射率, $B_\lambda(T_a(\tau_\lambda - \tau'_\lambda))$ 表示光学厚度为 $\tau_\lambda - \tau'_\lambda$ 、大气温度为 $T_a(\tau_\lambda - \tau'_\lambda)$ 时的大气辐射率。因此式(2)的第二项代表了大气的总的辐射率。显然,式(2)把大气的影响(吸收、向上和向下的辐射)作为一个负影响,消减了地面 $B_\lambda(T_s)$ 辐射值。

2 劈窗算法的推导

劈窗算法最初是为反演海面温度开发的,具体地说是针对 NOAA/AVHRR 的 4 和 5 通道设计的。随着遥感研究的深入,逐步转移到陆地表面温度的反演。但由于陆地表面的复杂性,使得陆地表面温度的反演比海洋表面温度反演要复杂得多。根据 Planck 方程热辐射函数,将 AVHRR 的两个热通道(通道 4 和 5)数据转化为相应的亮度温度。劈窗算法就是根据这两个亮度来演算地表温度的一种算法,它来源于对地表热传导方程的求解。由于大气层的影响和地表结构的复杂性,对该传导方程的不同简化和参数的不同求解方法导致产生不同的劈窗算法。劈窗算法的一般表达式如下:

$$T_s = A_0 + A_1 T_4 + A_2 T_5 \quad (5)$$

式中, T_s 是地表温度; A_0 、 A_1 和 A_2 是参数; T_4 和 T_5 分别是 AVHRR 热通道 4 和 5 的亮度温度。 T_s 、 T_4 和 T_5 的单位是绝对温度。

由于劈窗算法最初是为推算海洋表面温度而提出来的,海平面的相对均质性使假定海洋表面对辐射的均一性影响较为合理。然而,陆地表面的巨大差异性特征使这一假定很难成立,因此,劈窗算法在演算地表温度时必须考虑地表辐射面对热辐射的非均一性影响。热辐射也受大气影响,所以同时也得考虑大气的影晌。地表温度的反演公式可以表达如下^[7]:

$$B_i(T_i) = \tau_i(\theta) [\epsilon_i B_i(T_s) + (1 - \epsilon_i) I_i^\downarrow] + I_i^\uparrow \quad (6)$$

其中, T_s 为地表温度; T_i 为卫星观测到通道 i 的亮度温度; $\tau_i(\theta)$ 是通道 i 的大气透过率; $B_i(T_i)$ 是卫星高度通道 i 的辐射强度; $B_i(T_s)$ 是通道 i 地面辐射强度。 I_i^\downarrow 、 I_i^\uparrow 分别是大气向下和向上的辐射强度。向上的辐射强度 I_i^\uparrow 通常按如下公式进行计算^[7]:

$$I_i^\uparrow = \int_0^Z B_i(T_z) \frac{\partial \tau_i(\theta, z, Z)}{\partial z} dz \quad (7)$$

式中, T_z 为高程 z 的气温; Z 为传感器的高度; $\tau_i(z, Z)$ 为高程 z 到高程 Z 之间的大气向上透过率。大气的向上热辐射公式可用中值定律近似求解^[8,9]:

$$B_i(T_a) = \frac{1}{1 - \tau_i(\theta)} \int_0^Z B_i(T_z) \frac{\partial \tau_i(\theta, z, Z)}{\partial z} dz \quad (8)$$

式中, T_a 为大气的向上平均作用温度(又称大气平均作用能温度); $B_i(T_a)$ 为大气向上平均作用温度为 T_a 时的大气热辐射强度。因此,可以有近似解:

$$I_i^\uparrow = (1 - \tau_i(\theta)) B_i(T_a) \quad (9)$$

热辐射传导方程(3)的大气向下辐射总强度可视作来自一个半球状方向的大气热辐射之积分,因此,通常可用如下公式表示^[8]:

$$I_i^\downarrow = 2 \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} B_i(T_z) \frac{\partial \tau_i(\theta', z, 0)}{\partial z} \cos\theta' \sin\theta' dz d\theta' \quad (10)$$

式中, θ' 为大气向下辐射的方向角; ∞ 为地球大气顶端高程; $\tau_i(\theta', z, 0)$ 为从 z 到地表大气向下的透过率。当天空晴朗时,对于整个大气的每一个薄层(如 1 km)而言,一般可合理地假定 $\partial \tau_i(z, Z) \approx \partial \tau_i(\theta', z, 0)$ ^[9],即每个薄层的向上和向下的透过率相等。以这个假定为依据,把中值定理应用到式(10)中,得:

$$I_i^\downarrow = 2 \int_0^{\pi/2} (1 - \tau_i) B_i(T_a^\downarrow) \cos\theta' \sin\theta' dz d\theta \quad (11)$$

式中, T_a^\downarrow 为大气的向下平均作用温度,对该方程的积分项积分进行求解,得:

$$\int_0^{\pi/2} \cos\theta' \sin\theta' d\theta = 1 \quad (12)$$

因此,大气的向下热辐射强度可以近似地表示为:

$$I_i^\downarrow = (1 - \tau_i) B_i(T_a^\downarrow) \quad (13)$$

将 I_i^\uparrow 和 I_i^\downarrow 代入地表的热辐射传导方程(7),得:

$$B_i(T_i) = \epsilon_i \tau_i(\theta) B_i(T_s) + [1 - \tau_i(\theta)] \cdot [1 - \epsilon_i(\theta)] \tau_i(\theta) B_i(T_a^\downarrow) + [1 - \tau_i(\theta)] B_i(T_a) \quad (14)$$

为了解方程(14),用 T_a 替代 T_s 对方程的计算不产生实质性的影响^[14]。经过化简后方程如下:

$$B_i(T_s) = \epsilon_i \tau_i(\theta) B_i(T_s) + [1 - \tau_i(\theta)] \cdot [1 + (1 - \epsilon_i(\theta)) \tau_i(\theta)] B_i(T_a) \quad (15)$$

将方程(15)应用到 MODIS 的第 31 和 32 通道,得:

$$B_{31}(T_{31}) = \epsilon_{31} \tau_{31}(\theta) B_{31}(T_s) + [1 - \tau_{31}(\theta)] \cdot [1 + (1 - \epsilon_{31}(\theta)) \tau_{31}(\theta)] B_{31}(T_a) \quad (16)$$

$$B_{32}(T_{32}) = \epsilon_{32} \tau_{32}(\theta) B_{32}(T_s) + [1 - \tau_{32}(\theta)] \cdot [1 + (1 - \epsilon_{32}(\theta)) \tau_{32}(\theta)] B_{32}(T_a) \quad (17)$$

在方程组中,温度 T 和辐射强度 $B(T)$ 的函数关系式表达非常复杂,因此在解方程的过程中必须对此进行化简。在以往的方程求解算法中,通常是对 Planck 方程进行泰勒展开,取一次项进行化简。本文对辐射强度和温度进行了相关分析。对 31 和 32 波段做气温 $T(0^\circ \sim 50^\circ \text{C})$ 与辐射强度的散点图,发现温度与辐射强度在区间 $(0^\circ \sim 50^\circ \text{C})$ 之间,是近似线性关系。在 Planck 方程的计算中,本文对中心波长(即取波段的中间值)和有效波长(根据波段响应函数计算的有效平均值)的计算对结果的影响进行了分析,发现采用有效波长的精度要比中心波长要高。因此本文采用有效波长进行计算。

对 31 波段,线性方程为:

$$B_{31}(T) = 0.13787T_{31} - 31.65677, R^2 = 0.9971$$

对波段 32,线性方程为:

$$B_{32}(T) = 0.11849T_{32} - 26.50036, R^2 = 0.9978$$

利用 31 和 32 的两个近似线性关系,可以将式(16)和式(17)化简为:

$$0.13787\epsilon_{31}\tau_{31}T_s = 0.13787T_{31} + 31.65677\epsilon_{31}\tau_{31} - (1 - \epsilon_{31})[1 + (1 - \epsilon_{31})\tau_{31}](0.13787T_a - 31.65677) - 31.65677 \quad (18)$$

$$0.11849\epsilon_{32}\tau_{32}T_s = 0.11849T_{32} + 26.50036\epsilon_{32}\tau_{32} - (1 - \tau_{32})[1 + (1 - \epsilon_{32})\tau_{32}](0.11849T_a - 26.50036) - 26.50036 \quad (19)$$

为了便于计算,将方程(18)和方程(19)中的系数分别记为:

$$A_{31} = 0.13787\epsilon_{31}\tau_{31}$$

$$B_{31} = 0.13787T_{31} + 31.65677\tau_{31}\epsilon_{31} - 31.65677$$

$$C_{31} = (1 - \tau_{31})(1 + (1 - \epsilon_{31})\tau_{31})0.13787$$

$$D_{31} = (1 - \tau_{31})(1 + (1 - \epsilon_{31})\tau_{31})31.65677$$

$$A_{32} = 0.11849\epsilon_{32}\tau_{32}$$

$$B_{32} = 0.11849T_{32} + 26.50036\tau_{32}\epsilon_{32} - 26.50036$$

$$C_{32} = (1 - \tau_{32})(1 + (1 - \epsilon_{32})\tau_{32})0.11849$$

$$D_{32} = (1 - \tau_{32})(1 + (1 - \epsilon_{32})\tau_{32})26.50036$$

可以使式(18)、式(19)简化为:

$$A_{31}T_s = B_{31} - C_{31}T_a + D_{31} \quad (20)$$

$$A_{32}T_s = B_{32} - C_{32}T_a + D_{32} \quad (21)$$

则地表温度为:

$$T_s = (C_{32}(B_{31} + D_{31}) - C_{31}(D_{32} + B_{32})) / (C_{32}A_{31} - C_{31}A_{32}) \quad (22)$$

方程组中仍能存在 ϵ_i 、 τ_i 、 T_a 、 T_s 4 个未知数。在通常的算法中, q_i 假定为已知, τ_i 通常用 6 S、MODTRAN、LOWTRAN 等大气软件用标准大气模拟求得,从而使地表温度反演的精度受到限制。本文根据 MODIS 像元尺度和波段设置特点,分别对 ϵ_i 、 τ_i 进行估计,从而只剩大气平均作用温度 T_a 和地表温度 T_s ,解方程就得到了 T_s 。

3 比辐射率估计

本文利用覃志豪针对 TM 提出的比辐射率估计思想,将其应用到 MODIS 影像的比辐射率估计^[10~12]。地表辐射率主要取决于地表的物质结构和传感器的波段区间及像元大小。地球表面不同区域的地表结构虽然很复杂,但从 MODIS 的 1 km 的尺度来看,可以大体视作由三种类型构成:水面、植被和裸土。根据这三种类型地表的不同构成,可以用下式粗略估计 MODIS 各像元的不同地表辐射强度:

$$\epsilon_i = P_w R_w \epsilon_{iw} + P_v R_v (\tau_i + (1 - P_w - P_v) R_s \epsilon_{is}) \quad (23)$$

式中, P_w 和 P_v 分别是水面和植被在该像元内的构成比例; ϵ_{iw} 、 ϵ_{iv} 和 ϵ_{is} 分别是水面、植物和裸土在波段 i 区间内的辐射率; R_w 、 R_v 和 R_s 分别是水体、植被和裸土的温度比率,定义为 $R_i = (T_i/T)^4$,其中 i 分别代表 w 、 v 和 s 。覃志豪等根据这三种地表类型的温度差异进行模拟分析,得到如下结论:在 $5^\circ \sim 45^\circ \text{C}$ 范围内,这三种地表类型的平均温度比率分别为 $R_w = 1.00744$, $R_v = 0.99240$ 和 $R_s = 0.99565$ 。根据 ASTER 提供的常用地物比辐射率光谱库和 MODIS 的第 31 和 32 波段区间的 $10.780 \sim 11.280 \mu\text{m}$ 和 $11.770 \sim 12.270 \mu\text{m}$,对 31 波段的水体、植被、裸土比辐射率分别取 0.992、0.9844、0.9731,对 32 波段的水体、植被、裸土比辐射率分别取 0.989、0.9851、0.9832。对于 P_w 、 P_v 、 P_s 则是利用 NDVI 和 P V 指数来进行^[13]。

4 透过率估算

在地表反演过程中,水汽是估计大气透过率

的主要考虑因素。通常的做法是通过 MODTRAN、6S 和 LOWTRAN 等大气模型软件模拟大气透过率与大气水汽含量之间的关系。因为实时的大气剖面资料很难获得,所以这种模拟的结果精度有时难以得到保证。

覃志豪等^[12]提出了求算透过率的方法,即通过 MODTRAN 来求算大气水汽含量和透过率的关系,然后通过大气水汽含量来求算透过率。但对于 TM 来说,大气水汽含量很难从影像反演得到,从而限制了这一表达式的推广应用,但对于 MODIS,水汽含量可以从近红外波段反演出来,从而使得从遥感影像来反演透过率成为可能。对于从 MODIS 影像中反演水汽的推算见文献^[13],图 1 是用 LOWTRAN 模拟大气水汽与透过率的部分数据。模拟的波段范围适用于 NOAA-AVHRR 的 4 通道和 5 通道。MODIS 的第 31 和 32 通道的中心波长基本相对应,所以这些模拟数据适用于这两个传感器对应的波段。

分别对上面两个波长范围的透过率与大气水汽的模拟数据进行线性模拟,得到关系模拟图 2。对于 MODIS-31/32,水汽和透过率的关系为:

第 31 波段:

$$\tau_{31} = -0.10671w + 1.04015, R^2 = 0.994787$$

第 32 波段:

$$\tau_{32} = -0.12577w + 0.99229, R^2 = 0.995585$$

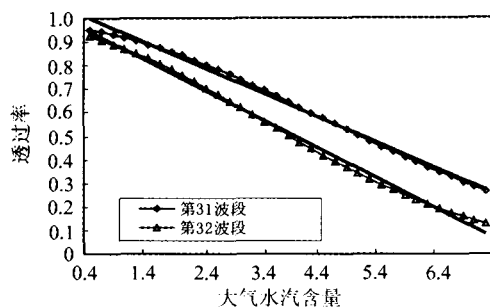


图 1 MODIS 的第 31 和 32 波段大气透过率变化关系
Fig. 1 Relationship of Atmospheric Transmittance and Water Vapor Content for MODIS Bands 31 and 32

从两个表达式看出, MODIS-31/NOAA-AVHRR4 和 MODIS-32/NOAA-AVHRR5 的透过率相差还是比较大的。反演地表温度可先用近红外波段反演大气水汽含量,然后运用上述两个统计表达式求算出大气水汽含量图像,进而求算 31 和 32 波段的透过率。

5 结 语

本文在分析 MODIS 波段特征的基础上,针对 MODIS 的波段特点,提出了适合于 MODIS 数据的地表温度反演的劈窗算法,即先对 Planck 方程进行线性简化,然后从 MODIS 的近红外波段反演大气水汽含量,通过建立大气水汽含量与热波段透过率的关系,从而可以从同一景影像中计算透过率,使透过率的求算精确到每一个像元,保证了透过率求算的实时性。针对 MODIS 热波段 1 km 尺度的特点,对比辐射的估计也是从同一景影像中估算得到。最后用环渤海地区的 MODIS 影像对本文的方法进行了应用和分析。

参 考 文 献

- 1 Li Z, Becker F. Feasibility of Land Surface Temperature and Emissivity Determination from AVHRR Data. *Remote Sensing of Environment*, 1993(43): 67~85
- 2 Qin Z, Karnieli A. Progress in the Remote Sensing of Land Surface Temperature and Ground Emissivity Using NOAA-AVHRR Data. *Int. J. Remote Sens.*, 1999(20): 2367~2393
- 3 Barton I J, Zavody A M, Orien D M. Theoretical Algorithms for Satellite-Devised Sea Surface Temperatures. *J. Geophys. Res.*, 1989(93): 3365~3375
- 4 Harris A R, Mason I M. An Extension to the Split-Window Technique Giving Improved Atmospheric Correction and to Total Water Vapor. *Int. J. Remote Sens.*, 1992(5): 881~892
- 5 Sobrio J A, Li L Z, Stoll M P. Impact of the Atmospheric Transmittance and Total Water Vapor Content in the Algorithms for Estimating Satellite Sea Surface Temperature. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 1993(31): 946~952
- 6 Price J C. Land Surface Temperature Measurements from the Split Window Channels of the NOAA7 Advance Very High Resolution Radiometer. *J. Geophys. Res.*, 1984(89): 7231~7237
- 7 Otl C, Stoll M. Effect of Atmosphere Absorption and Surface Emissivity on the Determination Land Temperature from Infrared Satellite Data. *Int. J. Remote Sens.*, 1993(10): 2025~2037
- 8 Qin Z H, Arnon Karnieli G D O. Derivation of Split Window Algorithm AVHRR Data. *Journal of Geophysical Research*, 2001(106): 22655~22670

- 9 Franca G B, Cracknell A P. Retrieval of Land and Sea Surface Temperature Using NOAA-11 AVHRR Data in Northeastern Brazil. *Int. J. Remote Sens.*, 1994 (15): 1 695~1 712
- 10 Kerr Y H, Lagouarde J P, Imbernon J. Accurate Land Surface Temperature Retrieval from AVHRR Data with Use of an Improved Split Window Algorithm. *Remote Sens. Environ.*, 1992 (41): 197~209
- 11 覃志豪, 李文娟. Landsat TM6 波段范围内地表比辐射率的估计. *国土资源遥感*, 2004(3): 28~32
- 12 覃志豪, Li W J, Zhang M H. 单窗算法的大气参数估计方法. *国土资源遥感*, 2003(5): 37~43
- 13 毛克彪. 用于 MODIS 数据的地表温度反演方法研究: [学位论文]. 南京: 南京大学, 2004

第一作者简介: 毛克彪, 博士生, 主要从事热红外、微波遥感、空间数据挖掘及 GIS 应用等方面的研究。

E-mail: maokebiao@126.com

The Research of Split-Window Algorithm on the MODIS

MAO Kebiao^{1,2,3} QIN Zhihao^{2,3} SHI Jiancheng¹ GONG Peng¹

(1) Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Datun Road, Chaoyang District, Beijing 100101, China)

(2) The Key Laboratory of Remote Sensing and Digital Agriculture, China Ministry and the Agriculture, Zhongguancun Nanda Street, Beijing 100081, China)

(3) International Institute for Earth System, Nanjing University, Hankou Road, Nanjing 210093, China)

Abstract: In this paper, the authors introduce the theory base of split-window algorithm and make a derivation for the split-window algorithm. As to the characters of the MODIS bands, the authors make a simplification for the Planck function. For the two main parameters of the split algorithm, the authors obtain them from the same image. Finally the authors retrieve the LST of Huanbohai region by using MODIS data and get the spatial distribution of LST in this region and make some analysis for the retrieval results.

Key words: LST; MODIS; split-window algorithm; transmittance

About the first author: MAO Kebiao. Ph.D candidate. his research activities include retrieval of LST in thermal field. microwave remote sensing and spatial data mining.

E-mail: maokebiao@126.com

下期主要内容预告

- ▶ 论网格技术及其与空间信息技术的集成
- ▶ 基于遥感和 GIS 的选址策略研究与实现
- ▶ Ikonos-2 在中国西藏地区的空间定位及其精度的应用研究
- ▶ 基于 Voronoi 内邻近的等高线树生成法
- ▶ GPS 实时监控系統及其在堆石坝施工中的初步应用
- ▶ 彩色图像的输入指标对层次再现的影响

李德仁, 等
高劲松, 等
陈楚江, 等
乔朝飞, 等
黄声享, 等
马桃林