

基于新型机载多角度传感器 AMTIS 的 LAI 反演

周宇宇,唐世浩,朱启疆,阎广建

(北京师范大学资源与环境科学系遥感与GIS研究中心,北京 100875)

摘要:以实地测量数据为先验知识,利用 AMTIS 数据对顺义地区的一块小麦地进行了叶面积指数(LAI)反演实验研究,并用实地 LAI 数据进行了验证。通过利用实测数据作为模型参数,以及对干湿土壤分类和匹配表的调整,使反演结果和反演速度得到了提高。

关键词:叶面积指数(LAI);多角度;辐射传输

中图分类号:TP 75 文献标识码:A 文章编号:1001-070X(2003)04-0009-04

0 引言

叶面积指数是森林生态系统中的一个重要结构参数。在生态过程、大气生态系统的交互作用以及全球变化等研究中,都需要叶面积指数资料^[1~4]。

测量植被冠层叶面积可采用称重法、坐标法、函数法、标准叶片序列图法和针刺法等,但这些方法都是点上测量,不能得到大面积 LAI 数据。遥感技术为大面积的 LAI 获取提供了条件。基于遥感的 LAI 反演方法主要为经验统计方法和模型反演方法。经验统计方法主要有植被指数法^[3]和像元成分分解法等,它们简单,应用方便,只是通过统计关系建立起 LAI 反演的方程,没有严格的物理意义。模型反演法包括 LUT 方法^[5]、神经网络方法及拟牛顿方法等,其中,LUT 方法的反演速度最快,对于计算机的要求较高;神经网络方法的主要优点是可以独立地反演一个参数,但是,要选择合适的网络结构,需要进行多次尝试;拟牛顿方法对于计算机的要求较低,但是对于模型的依赖性较大,反演速度较慢^[6]。Knyazikhin Y 等利用 MODIS 和 MISR 数据反演 LAI 和 FPAR^[7];Andres kuusk 等利用陆地卫星数据,通过马尔科夫链模型反演爱沙尼亚塔图观察台附近的 LAI^[8];张仁华等利用 NOAA-AVHRR 数据通过 N-K 模型反演了华北地区小麦 LAI^[9];Zhang Y^[10]和 Tian Y^[11]等分别利用 POLDER 数据和 LASUR、LANDSAT 数据对 MODIS LAI 采用的 LUT 方法进行了验证。

多角度观测是当前遥感发展的一个重要方向,它为气溶胶类型、云的形态和高度、土地覆盖类型等自然景观特征参数的反演提供了条件,同时为许多重要的气候、环境、生态问题提供了有用的信息^[12]。本文采用的 AMTIS 数据是一种新型的多角度机载传感器数据,相对于大尺度多角度数据 MISR、MODIS 及 POLDER 等来说,AMTIS 数据不仅能同时得到多角度的反射率数据,而且数据的分辨率很高(文中数据分辨率为 1.36 m)。本文利用新型的机载多角度数据,通过三维辐射传输方程建立匹配表,并在干湿土分类基础上进行了 LAI 反演。

1 实验地区和数据

实验地区位于北京市顺义区,中心点的坐标为北纬 40.195°,东经 116.574°。区内主要作物类型为小麦,主要的地表类型为小麦和裸土。为了提高反演精度,我们根据下垫面类型将小麦分为浇水小麦和不浇水小麦。

研究数据分为图像数据和地面实测数据两部分。图像数据主要来源于 AMTIS,AMTIS 分为可见光 VIR(0.4~0.7 μm)、近红外 NIR(0.7~0.9 μm)和热红外 TIR(7.5~13 μm)3 个波段,它的预定观测角度是 ±45 度范围内的 9 个角度(±45、±33.75、±22.5、±11.25、0)。但是,由于图像存在重叠,因此实际得到的观测角度远远多于 9 个角度。图像已经过了几何纠正和大气纠正,从图像上可以得到不

同角度的反射率。图像含有以下信息：同一点的成像时间、观测方位角和天顶角、地表类型以及这个点的反射率或温度。因此，从图像上可以得到一个像元不同角度的反射率曲线；实测数据包括实地测量的叶面积指数、土壤反射率数据、小麦反射率和透射率数据。这些实测数据都来自机星地同步实验。

2 模型反演

2.1 模型描述

本文 LAI 反演算法建立在求解 3D 辐射传输方程基础上^[7,8]，它将 3D 辐射传输问题表示为 2 部分（公式 1），一部分描述假设土壤为黑体的植被冠层内部的辐射（称黑土问题）；另一部分描述由于土壤和植被之间的相互作用产生的辐射（称 S 问题）。

$$r_{\lambda}(\Omega, \Omega_0) = w_{bs, \lambda} r_{bs, \lambda}(\Omega_0) + w_{s, \lambda} t_{s, \lambda} \cdot \frac{\rho_{eff}(\lambda)}{1 - \rho_{eff}(\lambda) \cdot r_{s, \lambda}} t_{bs, \lambda}(\Omega_0) \quad (1)$$

式中 $r_{\lambda}(\Omega, \Omega_0)$ 为波长 λ 处的冠层二向性反射分布函数(BRDF)， Ω 是观测角度， Ω_0 是太阳角度； $r_{bs, \lambda}(\Omega_0)$ 和 $t_{bs, \lambda}(\Omega_0)$ 分别是黑土部分的方向半球反射率和冠层透过率； $r_{s, \lambda}$ 和 $t_{s, \lambda}$ 分别是由冠层下面各向异性源形成的反射率和透过率；权重 $w_{bs, \lambda}$ 是黑土部分的 BRDF 与 $r_{bs, \lambda}(\Omega_0)$ 的比值，权重 $w_{s, \lambda}$ 是由冠层底部的各向异性源导致的离开冠层的反射和 $t_{s, \lambda}$ 的比值，权重 $w_{bs, \lambda}$ 和权重 $w_{s, \lambda}$ 是太阳高度角和方位角、波长以及 LAI 的函数；有效地面反射率 $\rho_{eff}(\lambda)$ 是由冠层底部反射辐射的百分比，它依赖于冠层底部的辐射特征，它可以作为一个参数来特征化地表反射。

2.2 模型的正向验证

为验证模型的可行性，采用实测数据进行模型的正向验证。模型主要参数包括单叶透射率和反射率、土壤反射率、叶面积指数，太阳方位角及太阳高度角。根据输入参数，通过模型计算了冠层双向反射率因子(BRF)，并和实际测量冠层的 BRF 进行了比较。本文主要采取了 15 个观测角度，如图 1 所示，其模拟条件是：太阳方位角为 128°，天顶角为 42°，叶的反射率为 47.341%，透射率为 47.395%，波段是 0.999 μm ，土壤的反射率为 15%。

从图 1 可以看出，在选择合适的模型参数情况下，模拟的多角度反射率和实测的多角度反射率吻合较好，在一些特定的角度下，两者非常接近。另外，我们模拟了将叶面积指数分别加减 0.5 时的多角度反射率。从图 1 可以看出，根据实测的反射率

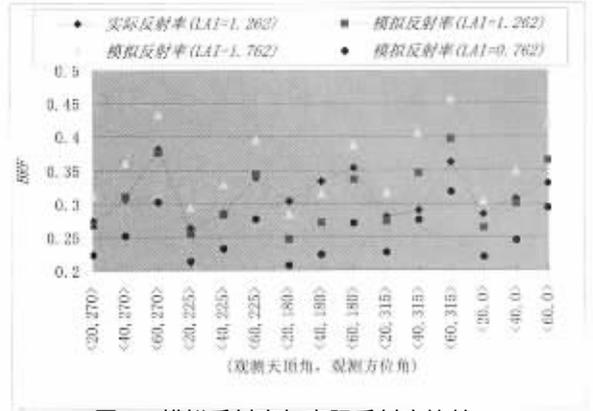


图 1 模拟反射率与实际反射率比较

数据，通过模型可以将不同的叶面积指数区分开来，从而反演出实际的叶面积指数。但对于个别角度，模型不能反映实际的情况（但也不排除测量过程中存在误差的可能）。

2.3 反演方法

2.3.1 MODIS 的 LAI 算法

在 MODIS 的 LAI 反演算法^[5]中，将所有的植被类型归纳为 6 种：草地和谷类作物、灌丛、阔叶作物、萨瓦那稀疏草原、阔叶林和针叶林。对于不同的植被类型，采用了不同的结构参数和土壤条件。6 个植被类型分别对应了不同的植被结构参数。

对于给定的太阳角度和观测角度，可以得到图像上的反射率 d_k ，同时，通过模型的模拟，对不同的植被类型应用不同的结构参数，得到这些角度下不同叶面积指数的反射率 $r_k(\Omega, \Omega_0, p)$ 。反演公式如(2)式。

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{r_k(\Omega, \Omega_0, p) - d_k}{\delta_k} \right)^2 \leq 1 \quad (2)$$

式中 p 为给定的植被土壤类型； δ_k 为观测中的不确定性，如 MISR 传感器中就提供了这个信息。公式(2)反演的是一组叶面积指数，通过这组叶面积指数的分布概率就得到了权重平均的叶面积指数。

2.3.2 匹配表算法

基于上面的算法，我们设计了 LAI 的反演方法。由于模型的复杂性，我们不能直接通过求解模型的反函数来进行反演，而且，对于大面积图像上点的计算，由于计算量的关系，本文采取了类似查找表的方法。具体的代价函数表达式为

$$F(x) = \sum_{i=0}^m (\rho_i - \rho'_i)^2 \quad (3)$$

式中 $F(x)$ 为代价函数； m 为观测的角度数； ρ_i 为图像上面的观测数据； ρ'_i 为模拟得到的多角度反

射率数据。

本研究根据已有的先验知识,将需要模拟的 LAI 范围确定在 0~3 之间,并将 LAI 的步长定为 0.1,这个精度已经能够满足要求。

首先建立匹配表。在该过程中,对原来的算法进行了调整,在我们的方法中,由于叶面积指数比较小,因此土壤的影响比较大。通过实验,对土壤的类型进行了划分,将土壤划分为干土和湿土两个类别,分别建立了它们的 LAI 反演匹配表。

图像上同一个像元包括 4 种数据类型,分别是土地类别、观测天顶角、观测方位角及反射率。对于土地类别来说,只有一个值;对于观测角度来说,前面已经讲过,AMTIS 的预定角度有 9 个,但是由于重叠的存在,实际的观测角度远远大于 9 个。通过实验,我们选取了 8 个角度,可以得到 25 个波段的图像。第 1 个波段对应的是土地类型;第 2、3、4 波段分别对应第一个角度下的观测天顶角、观测方位角和这些角度下的反射率;第 5、6、7 波段分别对应第 2 个角度下的观测天顶角、观测方位角和这些角度下的反射率,依此类推。对于匹配表 1 而言,第 1 项是观测天顶角,第 2 项是观测方位角,第 3 项到第 32 项依次是这个角度下从 LAI 等于 0.1 到 LAI 等于 3 时的反射率。

表 1 匹配表结构

观测天顶角	观测方位角	反射率 (LAI=0.1)	...	反射率 (LAI=3.0)
数值 1	数值 1	数值 1		数值 1
数值 2	数值 2	数值 2		数值 2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
数值 n	数值 n			数值 n

建立了匹配表之后,下面就是 LAI 的反演。首先,根据图像上土地类型选择合适模型参数的匹配表;然后,根据图像上观测天顶角找到匹配表里面的相同的观测天顶角;再根据图像上观测方位角查找匹配表里面已有观测天顶角的反射率;按照相同的方式,分别找到 8 个角度匹配表里面的反射率数值,根据代价函数查找到 LAI。对图像上所有点进行同样的过程,最后得到了图像的叶面积指数。

3 结果验证及误差来源

3.1 结果验证

用上述方法,选择近红外波段(0.7~0.9 μm)的多角度数据对 AMTIS 图像进行反演,得到了叶面积指数分布图(图 2)。图中显示的规则圆点和线条

是由传感器影响产生的。根据试验地基本情况,图上可以分为 3 个主要地块。在实验设计中,中间的地块小麦长势最好。从图上可以看出反演叶面积指数的大小跟实际叶面积指数趋势吻合。为了进一步分析反演的结果,本文选取了这 3 个地块已有的 26 个点进行了分析,由于实地测量的 LAI 和图像反演的 LAI 存在尺度不一致的问题,这里主要分析反演的叶面积指数的相对分布,所以采用了相关系数的方法。根据测量点的经纬度坐标,提取了这些点在图像上的反演结果,反演的 LAI 和实测的 LAI 相关系数是 0.638。

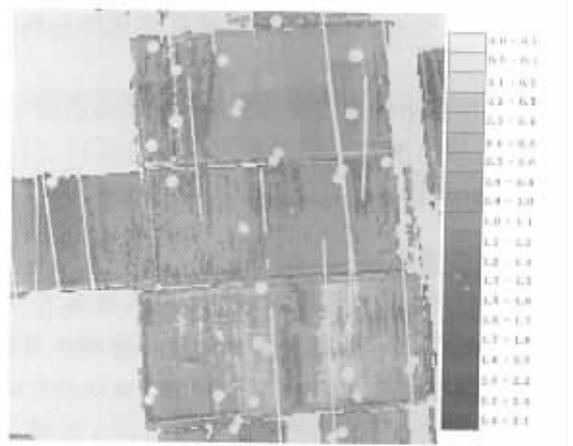


图 2 反演的叶面积指数分布

3.2 误差来源

反演的主要误差可以分为 3 大类:先验知识误差、图像反射率误差及模型误差。先验知识的一个主要误差是地物分类的误差,由于土壤分类的误差,导致了一些地区叶面积指数的反演结果明显偏小,因此,地物分类是这个方法的一个重要方面;图像反射率误差主要来源于传感器误差、大气纠正误差和几何纠正误差;反演的另一个主要误差是模型误差,在三维辐射传输模型中,3 个边界条件(顶部、底部、侧面)的假设认为,侧面的入射辐射等于 0,但是,当研究区域较小时,会产生误差。在进行反演结果检验时,还有来自测量的误差,测量误差主要分为实地测量过程中存在的位置误差以及 LAI 的测量误差。由于这次使用的图像分辨率很高,因此对地理位置的精度要求较高。

4 分析与讨论

(1)对于高分辨率机载多角度数据,利用冠层反射模型方法可以反演出叶面积指数。与单一方向的遥感相比,多角度遥感能得到固定目标的多角度观

测数据,因此可以获得更为丰富的地物三维空间结构信息,从而为遥感反演提供更丰富的信息。

(2)与实地测量的叶面积指数相比,应用新型的多角度成像仪能够比较正确地反演出叶面积指数,模型反演具有更好的理论基础和效果。

(3)反演过程中的先验知识对于反演结果是非常重要的。本文用到的先验知识包括地物的分类信息、模型的参数(叶的反射率、透过率,土壤的反射率)等,通过这些先验知识输入,可以减少反演的不确定性,加快反演的速度。

(4)通过建立叶面积指数匹配表以及对干湿土壤分类和匹配表的调整,可以使反演速度和精度大大提高。

(5)反演中的主要误差来源于地物分类误差(包括干湿土分类误差)、图像反射率测量误差(包括大气纠正、几何纠正中的误差)和所采用模型的误差。

致谢:感谢阎广建、丁新、秦军等在论文完成中提供的帮助。文章中部分采用了中科院遥感所、中科院地理所和北京市农林科学院等本课题组成员提供的数据,在此一并表示感谢!

参考文献

[1] Chen J M , Josef Cihlar. Retrieving Leaf Area Index of Boreal Conifer Forest Using Landsat TM Images [J]. Remote Sens. Environ , 1996 , 55(2) : 153 - 162.

[2] 张佳华,符淙斌. 生物量估测模型中遥感信息与植被光合参数的关系研究 [J]. 测绘学报, 1999 , 28(2) : 128 - 132.

[3] Chen J M , Pavlic G , Brown L , et al. Derivation and validation of Canada - wide coarse - resolution leaf index maps using high - resolution satellite imagery and ground measurements [J]. Remote Sens. Environ , 2002 , 80(1) : 165 - 184.

[4] Chen J M , Paul M Rich , Stith T. Gower et al. Leaf area index of

boreal forests : theory , techniques , and measurements [J]. Journal of Geophysical Research , 1997 , 102(24) : 29429 - 29443.

[5] Myneni R B , Nemani R R , Running S W. Estimation of Global Leaf Area Index and Absorbed Par using radiative transfer models [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing , 1997 : 35(6) : 1380 - 1393.

[6] Combal B , Baret F , Weiss M , et al. Retrieval of Canopy Biophysical Variables from Bidirectional Reflectance : Using Prior Information to solve the Ill - posed Inverse Problem [J]. Remote Sens. Environ , 2002 , 84(1) : 1 - 15.

[7] Knyazikhin Y , Martonchik J V , Myneni R B , et al. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data [J]. J. Geophys. Res. , 1998 , 103(D24) : 32257 - 32275.

[8] Andres Kuusk , Zhang R H. Monitoring LAI and Chlorophyll content inversion of a CR analytical mode [J]. Journal of Remote Sensing , 1997 , 1(suppl) : 166 - 170.

[9] Zhang R H , Andres Kuusk , Chen Gang , et al. An inversion approach of BRDF for wheat in North China Using NOAA - AVHRR image [J]. Journal of Remote Sensing , 1997 , 1(suppl) : 171 - 180.

[10] Zhang Y , Tian Y , Knyazikhin Y , et al. Prototyping of MISR LAI and FPAR and algorithm with POLDER data over Africa [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing , 2000 , 38(5) : 2402 - 2418.

[11] Tian Y , Zhang Y , Yuri Knyazikhin , et al. Prototyping of MODIS LAI and FPAR algorithm with LASUR and LANDSAT data [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing , 2000 , 38(5) : 2387 - 2401.

[12] David J Diner , Gregory P Asner , Roger Davies , et al. New Directions in Earth Observing : Scientific Applications of Multiangle Remote Sensing [J]. Bulletin of American Meteorological society , 1999 , 80(11) : 2209 - 2228.

[13] 张仁华,孙晓敏,苏红波,等. 遥感及其地球表面时空多要素的区域尺度转换 [J]. 国土资源遥感, 1999 (3) : 51 - 57.

LAI RETRIEVAL BASED ON THE NEW AIRBORNE MULTI - ANGLE SENSOR AMTIS

ZHOU Yu - yu , TANG Shi - hao , ZHU Qi - jiang , YAN Guang - jian

(Research center for remote sensing and GIS , Beijing Normal University Beijing 100875 , China)

Abstract: Leaf area index (LAI) is an important biophysical parameter , and remote sensing provides the probability for the LAI retrieval. LAI inversion based on the model is the main orientation of the LAI retrieval , and the multi - angle data are important parameters in the model - based inversion. The new airborne multi - angle sensor

(下转第 21 页)

[13] Gried V D , OWE M. On the Relationship Between Thermal Emissivity and the Normalized Difference Vegetation Index for Natural Surface[J]. International Journal of Remote Sensing , 1993 , 14 (6) : 1119 - 1131.

[14] 刘东琦 , 王介民. 利用 ATSR/ERS - 1 资料研究复杂下垫面壁辐射率的变化 [J]. 大气科学 , 1999 , 23 (5) : 613 - 622.

[15] Price J C. Estimating Surface Temperatures from Satellite Thermal Infrared data - a Simple Formulation for the Atmospheric Effect [J]. Remote Sensing of Environment , 1983 , 13 : 353 - 361.

[16] Wang J M , Mitsuta Y. An Observation Study of Turbulent Structure and Transfer Characteristics in Heihe Oasis [J]. J. Meteor. Soc. Japan , 1992 , 70 (2) : 1147 - 1154.

[17] 马耀明 , 王介民. 卫星遥感结合地表观测估测非均匀地表区域能量通量 [J]. 气象学报 , 1999 , 57 (2) : 180 - 189.

A REMOTE SENSING STUDY OF THE URBAN THERMAL EFFECT ON ZHANGYE AND ITS SURROUNDING OASIS AREA

LIU San - chao , ZHANG Wan - chang

(International Institute for Earth System Science , Nanjing University , Nanjing 210093 , China)

Abstract: Landsat TM data have been widely utilized in resource and environment studies. Nevertheless , reports on researches combining thermal infrared band (TM6) with the other TM bands data for investigating various land surface processes remain limited in literature. In this paper , an algorithm was proposed and tested for a target area in Zhangye and its surrounding oasis areas. This study combines the TM6 for deriving planetary brightness temperature (PBT) and land surface temperature (LST) by using mono - window algorithm with the other TM bands data so as to provide several essential parameters required by the mono - window algorithm. In this algorithm , TM1 - 5 and 7 were atmospherically corrected by means of Gilabert ' s method to obtain several important parameters , and then PBT and LST were calculated by means of mono - window algorithm using TM6 band. The derived LST compared with the field observations of several principal land use/cover categories suggests good applicability of the algorithm. Spatial distribution of LST and PBT was analyzed with NDVI distributions in the target area , and the strong negative correlations between LST , PBT and NDVI suggest that vegetation is a key factor controlling the spatial pattern of land surface heat flux. All this implies a great potential of thermal and optical remote sensing for urban thermal effect and urbanization studies.

Key words: Mono - window algorithm ; Brightness temperature ; Land surface temperature ; Urban heat island effect

第一作者简介：刘三超(1979 -) , 男 , 南京大学城资系硕士 , 从事地表参数遥感反演和水文水资源研究。

(责任编辑：刁淑娟)

=====

(上接第 12 页)

AMTIS can obtain the simultaneous multi - angle and high - resolution data. Using the AMTIS data based on the three - dimensional radiative transfer model , an inversion experiment on a wheat field in Shunyi was carried out on the basis of the AMTIS multi - angle data and the prior information. And the result was verified with the measured LAI data. The inversion precision and rate were improved by adjusting the soil classification and the matching table. The main errors in the process of inversion are also analyzed in this paper.

Key words: Leaf area index (LAI) ; Multi - angle ; Radiation transfer

第一作者简介：周宇宇(1979 -) , 男 , 2001 年毕业于北京师范大学资源与环境科学系 , 现就读于北京师范大学遥感中心硕士研究生 , 主要研究方向为遥感与地理信息系统。

(责任编辑：刁淑娟)