

文章编号: 1007-4619 (2004)04-0295-05

利用 AMTIS 数据反演植被和土壤温度

范闻捷¹, 徐希孺^{1,2}, 王奋勤¹, 刘 强³

(1 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871; 2 北京师范大学遥感与地理信息系统研究中心, 北京 100875;

3 中国科学院遥感应用研究所 遥感信息科学开放研究实验室, 北京 100101)

摘要: 遥感陆面温度(LST)是目前遥感界面临的重要课题, 组分温度反演则为 LST 反演的主攻目标。如果混合像元组分间的温度及发射率存在明显差别, 就可以从多角度热辐射亮度变化中分离出组分温度的信息。在热辐射矩阵模型的基础上, 讨论了确定可反演参数和反演组分温度的方法, 并以 AMTIS 多角度热红外图像为数据源, 在进行几何和大气纠正后, 尝试利用矩阵反演方法分解混合像元中的植被和土壤温度。误差分析表明土壤温度反演结果较好, 但植被温度的反演精度不高。

关键词: AMTIS; 热红外; 多角度; 组分温度反演

中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

1 引言

遥感陆面温度(LST)是目前遥感界面临的一个重要课题, 它对深入了解地球表层系统各尺度水、热、碳循环过程, 推进旱情预报、作物估产、中长期天气预报等研究课题都有重要意义。陆地表面上混合像元普遍存在, 精确反演陆面温度十分困难。像元平均温度及平均比辐射率的概念本身用于陆地表面存在不确定性^[1], 因此反演像元的组分温度一直是热红外研究的重要课题。只要组分间的温度及发射率存在明显差别, 就可以从多角度热辐射亮度变化中分离出组分温度的信息^[2,3]。

根据热辐射的矩阵表达, 多角度辐射亮度与组分温度的黑体辐射亮度之间的关系可以用矩阵形式来表达^[4]:

$$L(\theta_k)_{K \times 1} = W_{K \times J} L_b(T)_{J \times 1} \quad (1)$$

其中 $L(\theta_k)_{K \times 1}$ 为传感器测得的多角度热辐射亮度值所构成的矢量, 角标 k 代表传感器不同视角的编号, 其取值范围为 $[1, K]$; $L_b(T)_{J \times 1}$ 为组分温度的黑体辐射亮度构成的矢量, j 代表组分编号, 其取值范围为 $[1, J]$ 。矩阵 $W_{K \times J}$ 为有效比辐射率矩阵, 是可

视组分在视场中的面积比例矢量和组分发射率矩阵的乘积。每一观测角度的矩阵 $\overline{W}_{1 \times J} = \overline{A}_{1 \times 1}^T \cdot \epsilon_{1 \times J}$, 其中 $\overline{A}_{1 \times 1}^T = [a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_J]$, a_i 为某一观测角度时传感器视场内某组分的面积比例, i 代表传感器视场组分编码, 它的取值区间为 $[1, J]$ 。 $\overline{A}_{1 \times 1}^T$ 完全由像元内部结构和视角与目标之间的几何关系决定, $\epsilon_{1 \times J}$ 为在考虑了热辐射的多次散射情况下建立的比辐射率矩阵, 在已知像元内部结构和物理性质的条件下, $\epsilon_{1 \times J}$ 可以通过蒙特卡罗方法模拟获得^[4,5]。

矩阵 $W_{K \times J}$ 的性质决定于以下两个方面: (1) 体系内各组分的物理性质和几何结构; (2) 传感器视角 (包括视角的天顶角 θ 和方位角 Ψ) 与目标之间复杂的几何关系。对行播作物而言, 描述组分的物理性质的因素包括: 土壤的发射率 (ϵ_s)、植被的发射率分别 (ϵ_v)、叶面积指数 (LAI)、叶倾角 (LAD) 等。描述几何结构的因素包括: 作物的茎宽 (W)、茎高 (H) 和茎间距 (D), 以及传感器扫描平面与行向间的夹角 (即相对方位角 Ψ) 等。显然这些参数的取值不同, 矩阵 $W_{K \times J}$ 的性质会有显著变化。这些参数都可以通过多年地面观测获得, 本文将其作为先验知识, 取固定值, 矩阵 $W_{K \times J}$ 也就可以计算出来。只要 $W_{K \times J}$ 的逆矩阵存在, 则便可利用多角度热辐射亮度

收稿日期: 2002-10-16; 修订日期: 2003-02-11

基金项目: 国家自然科学基金 (批准编号: 40171073)、国家高技术发展计划 (批准编号: 2001AA135110)、科技部国家重点基础发展规划项目 (批准编号: G2000077900)、教育部博士点基金资助。

作者简介: 范闻捷 (1972-), 女, 讲师; 2000年7月获得北京大学城市与环境学系自然地理专业博士学位; 2002年7月北京大学遥感与地理信息系统研究所博士后出站, 现为北京大学遥感与地理信息系统研究所讲师, 主要研究方向为: 定量遥感、热红外遥感, 已发表多篇学术论文。

求得组分温度。

目前星载传感器中只有 ATSR 能提供两个角度的热红外数据,多角度热红外数据较缺乏。AMTIS (Airborne Multi-angular TIR/VNIR Imaging System) 是中国自行开发研制的机载多角度成像原理样机,为组分温度反演提供了新的热红外多角度数据源^[6,7]。本文将以行播冬小麦为例,以 AMTIS 多角度热红外图像为数据源,在热辐射矩阵模型的基础上,尝试进行组分温度的反演。

2 组分温度反演的原理

以“最小二乘”原则作为最优的标准,在满足 $\frac{\partial (E^T \cdot E)}{\partial L_{b\lambda}(T)_{J \times 1}} = 0$ (E 为输入误差)的条件下,可以求取 $L_{b\lambda}(T)_{J \times 1}$ 的值^[8,9]:

$$L_{b\lambda}(T)_{J \times 1} = \left(W_{K \times J}^T W_{K \times J} \right)^{-1} W_{K \times J}^T L(\theta_k)_{K \times 1} \quad (2)$$

上标“T”表示矩阵的转置,“-1”表示矩阵的逆。公式(2)是公式(1)的“最小二乘”意义下的最优解。如果用 $\delta(T)_{J \times 1}$ 代表输入误差项(E)导致的反演输出误差,则:

$$\delta(T)_{J \times 1} = \left(W_{K \times J}^T W_{K \times J} \right)^{-1} W_{K \times J}^T E \quad (3)$$

公式(3)是线性方程组的绝对误差传递公式。

基于矩阵表达式的组分温度反演方法实际上就是对矩阵 $W_{K \times J}$ 的求逆过程^[4]。因此矩阵 $W_{K \times J}$ 的性质对组分温度反演的稳定性和反演精度具有决定意义。矩阵 $W_{K \times J}$ 的每一个行矢量描述了该视角天顶角(θ_k)条件下,像元内各组分黑体辐射亮度在总辐射亮度值中的权重系数,矩阵 $W_{K \times J}$ 的某一列矢量代表某一组分的权重系数随视角天顶角的变化规律^[8]。矩阵 $W_{K \times J}$ 应满足对角占优,这样各列矢量间相关性越小,反演结果越稳定,误差也越小,反之反演结果不稳定,误差也会放大。

但由 AMTIS 工作原理可知,当传感器视角天顶角由 0° (垂直视)向 90° (水平视)转变,则透视深度将随之变浅,以行播作物为例,当垂直视时,传感器的测值包含了较多的土壤热辐射能量;随着向水平视转移,越来越多的是来自植被的热辐射能量。在不同视角条件下在体系内部热辐射的传递方式都遵循同一个规律—辐射传输方程,且组分在视场的中面积比例之和始终恒等于“1”,因此不同组分在传感器中所占的比重始终处在此消彼涨之中。因此矩阵 $W_{K \times J}$ 中各列矢量间以及多角度热辐射亮度值间都不可避免地具有相关性^[10]。不可能有几个角度的

信息就能够反演几个参数。因此在进行组分温度反演之前须首先计算可反演独立成分数,确定反演参数。

根据线性方程组的相对误差传递公式^[9,11],下列公式成立:

$$\frac{\left\| \frac{\partial L_b(T)_{J \times 1}}{L_b(T)_{J \times 1}} \right\|}{\left\| W_{K \times J}^{-1} \right\| \left\| W_{K \times J} \right\| \left[\frac{\left\| \frac{\partial W_{K \times J}}{W_{K \times J}} \right\|}{\left\| W_{K \times J} \right\|} + \frac{\left\| \frac{\partial L(\theta_k)_{K \times 1}}{L(\theta_k)_{K \times 1}} \right\|}{\left\| L(\theta_k)_{K \times 1} \right\|} \right]}{1 - \left\| W_{K \times J}^{-1} \right\| \left\| \delta W_{K \times J} \right\|} \leq \quad (4)$$

此处符号 $\| \|$ 代表取矢量或矩阵的范数, $\frac{\left\| \frac{\partial L_b(T)_{J \times 1}}{L_b(T)_{J \times 1}} \right\|}{\left\| L_b(T)_{J \times 1} \right\|}$ 代表反演值相对误差, $\frac{\left\| \frac{\partial W_{K \times J}}{W_{K \times J}} \right\|}{\left\| W_{K \times J} \right\|}$ 与 $\frac{\left\| \frac{\partial L(\theta_k)_{K \times 1}}{L(\theta_k)_{K \times 1}} \right\|}{\left\| L(\theta_k)_{K \times 1} \right\|}$ 分别代表模型相对误差和测量值相对误差。 $\left\| W_{K \times J}^{-1} \right\| \left\| W_{K \times J} \right\|$ 为条件数。公式(4)表明线性方程组病态状况完全由条件数决定。求得条件数就可根据将反演值的相对精度和模型与测量的相对误差带入公式(4),计算反演相对误差的范围,判断可反演的独立成分数。

3 AMTIS 数据获取与处理

3.1 AMTIS 热红外数据介绍

AMTIS 热红外波段波长范围:7.5—13 μ m,噪声等效温度 0.2—0.4K。AMTIS 设计最大观测角度为 45 度,它通过使用摆动装置,沿航线方向从前向后摆动,可以获取 9 个角度的图像。当航速 70m/s,航高 4000m 时,AMTIS 机下点可见光和近红外波段分辨率为 1.36m,热红外波段的分辨率为 2.7m 左右。相邻两景垂直方向的图像约 40% 的重叠率,大倾斜角的图像则有更高的重叠率。航线上每一个地面点都被观测 15—20 次,如果考虑相邻航线的重叠,观测数还会更多。

3.2 试验区介绍

AMTIS 机载飞行试验于 2001 年 4 月 11 日在顺义进行。飞行试验区位于东经 116°24'—116°54',北纬 40°09'—40°15',是中国北京市郊区顺义区的农田,属华北平原的一部分。主要农作物为行播冬小麦,田块较大,边界平直,有利于从高空分辨率热红外图像上提取均一像元。

在飞行试验的同时,我们还对大气廓线、地面的

土壤和植被比辐射率、辐射亮度温度,农田小气候(包括天空辐射、太阳辐射强度、地表净辐射、气温、水汽压、风向、风速、能见度)和农田基本参数(包括冠层结构、叶面积指数、冠层孔隙率、土壤含水量和粗糙程度等项目)进行了同步观测。

3.3 AMTIS 多角度热红外数据的校正

AMTIS 数据用于遥感反演前需要进行一系列的校正和处理,其中几何校正和大气纠正是最基本的预处理工作。机载 AMTIS 多角度数据量大,分辨率高,几何校正工作量大。本文采用文献[12]中介绍的几何校正方法,基本能满足地表模型的需要。

传感器所接收到的热红外辐射包括3部分:地表热红外辐射经大气传输衰减到达传感器部分、半球空间的大气下行辐射经过地表反射后再通过衰减到达传感器的部分和地表与传感器之间的大气上行辐射项。

根据飞行试验中同步的大气无线探空观测数据,我们利用大气辐射传输模式 MODTRAN 程序来计算大气透过滤和大气上行和下行辐射。由于飞行时天气条件很好,本试验在假定大气水平均一,大气参量只与观测天顶角有关而与方位角无关的条件下,得到校正后的地表亮度温度。

4 用 AMTIS 热红外多角度数据反演组分温度

根据顺义飞行试验场地的实际条件,选择有代表性的行播冬小麦为例,反演组分温度。首先在考虑土壤光照面与阴影面之间存在温度差异以及与作物的孔隙率和组分间的多次散射等条件下,建立行播冬小麦矩阵模型。

4.1 冬小麦矩阵模型的构建

陆面组分温度反演采用为2001年4月11日上午10:45—11:00间飞行于顺义实验区赵全营乡三号地采集的热红外图像,同时在地面利用面源式点温计和 AGA80 型辐射计测量冬小麦冠层和土壤的组分温度。并利用 Bomen 傅里叶红外高光谱辐射计获得了观测样地土壤和冬小麦叶面连续光谱带的辐射值与天顶角的大气下行辐射值,反演得到在

10.6—14.0 μm 波段间的平均组分比辐射率值, $\epsilon_s = 0.98$, $\epsilon_v = 0.97^*$ 。飞行实验场其他农田结构参数为 $W=5\text{cm}$, $H=13.7\text{cm}$, $D=10\text{cm}$, $LAI=1.5$, LAD 为喜直型(结构图示见图1)。计算飞行时的瞬时太阳高度角(θ_s)和方位角(Ψ_s)以及传感器的观测高度角(θ)和方位角(Ψ),根据实测参数利用蒙特卡罗方法模拟计算土壤光照面和阴影面以及植被的面积比例和发射率矩阵,进而获得有效发射率矩阵 $W_{K \times J}$ 。

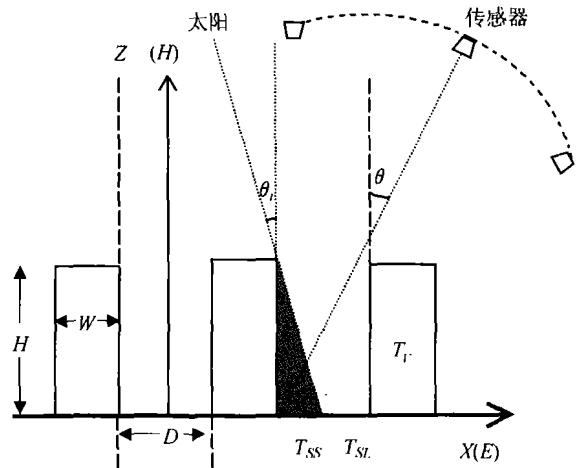


图1 行播作物热辐射矩阵模型剖面图

Fig. 1 The vertical sectional drawing of row winter wheat field

4.2 组分温度反演

取 AMTIS 的9个观测角度建立有效比辐射率矩阵 $W_{K \times J}$,如果要求反演值的相对精度为1%,而已知模型相对误差与测量相对误差分别为0.1%,则因条件数=13.78,所以可反演的独立成份数为2,如果要求反演值的相对精度降到2%,因条件数=22.73,则可反演的独立成份数为3。因此利用 AMTIS 提供的多角度热红外信息可以反演2—3个参数,根据 $W_{K \times J}$ 组分权重分布特征可知,可反演的参数依次为土壤光照面温度(T_{SL})、土壤阴影面温度(T_{SS})和植被温度(T_V)。

反演组分温度之前,我们首先对 AMTIS 热红外图像进行分类,并选择行播冬小麦像元为反演目标。实际飞行中由于飞机的偏向和俯仰,AMTIS 成像的9个角度并不能准确地等于其设计角度,且每一景图像的中心和边缘的观测角度也有差别,因此每个像元的视角天顶角和方位角都不同,需要根据图像

* 肖青等,利用红外高光谱辐射计数据反演比辐射率,2002,待发表。

本身的几何特征来计算,有一定误差。为加快反演计算速度并保证反演稳定性,我们随机抽取 10 块样本(图 2),计算各样本的平均视角天顶角和方位角,根据实测农田结构参数分别计算 $W_{k \times j}$ 。然后我们根据前面介绍的反演方法,利用 9 个角度的 AMTIS 热红外亮度值,分别反演土壤光照面温度、土壤阴影面温度和植被温度。反演结果见表 1。



图 2 地面同步观测区及样本分布图(黑色横线为航线,黑色方块为抽取的样本)

Fig. 2 Distribution of sample in the ground synchronism test area (the black line is the flight course and the black boxes are the samples)

表 1 土壤和植被温度反演结果(单位: °C)

Table 1 The retrieval result of soil and plant temperature

组分	实测温度	反演组分温度 (平均值)	最大误差	最小误差	标准差
T_{sl}	24	24.61	1.72	0.57	0.99
T_{ss}	15.7	15.89	2.11	1.01	1.46
T_v	15.8	13.15	6.25	0.76	3.47

4.3 误差分析

从表 2 可以看出,土壤阴影面和光照面温度的反演误差在 1K 到 1.5K 左右。植被温度的反演误差为 3.47K,反演精度较低。原因有以下几个:(1)飞行试验期小麦叶面积指数较低,视角天顶角在 50 度以内时小麦在视场所占比例较小,提供的有效信息量也少;(2)AMTIS 的视角天顶角在 50 度以内, $W_{k \times j}$ 矩阵中各角度组分有效比辐射率相关性较大(>0.9),导致反演误差增大;(3)AMTIS 的角度控制存在一定误差,一些关键角度如 0 度视角天顶角发生偏离,不能提供反演所需最大信息量;(4)由于灌溉条件限制,试验场水分条件不均一,存在明显湿度梯度,因此土壤和植被的温度分布并不均一。为分析误差原因,在

其他参数不变的情况下,我们数值模拟了 $LAI=3.0$, 6.0 两种情况下的多角度数据并进行组分温度反演,发现如果在 $LAI=3.0$ 时,取视角天顶角为 0、30、50,则植被反演精度能提高到 2.5K 左右。如果在 $LAI=6.0$ 时,则植被反演精度更高,土壤的反演精度降低。可见视场内各组分有效信息量的多少是影响组分温度反演精度的主要原因。

5 结论与讨论

本文利用 AMTIS 在顺义飞行试验的热红外多角度数据反演地表土壤和植被的组分温度,并与地面实际观测数据相验证的结果表明,土壤光照面温度的反演精度最高,土壤阴影面温度次之,植被温度的反演精度较低。

产生误差的主要原因是:小麦叶面积指数较小,进入视场内的植被有效信息量过少;各角度数据之间的相关性甚高^[10];以及 AMTIS 角度控制出现的误差和试验场地水分不均匀等。如果选择合适的冬小麦生长期和适当的观测角度,完全能准确反演小麦、土壤光照面和阴影面温度。

实践表明,以热辐射矩阵表达法为基础的反演方法可以较准确反演组分温度,本文所论述的反演组分温度的全过程对今后实现星载多角度热红外组分温度反演具有重要的参考价值。

参考文献 (References)

- [1] Zhang R H, Li Z L, Tang X, et al. Relativity of Isothermal Definition and Its Scaling Effects in Quantitative Thermal Infrared Remote Sensing[C]. Proceedings of the First International Symposium on Recent Advance in Quantitative Remote Sensing, Valencia, 2002, 590—597.
- [2] Xu X, Chen L F, Zhuang J L. Genetic Inverse Algorithm for Retrieval of Component Temperature of Mixed Pixel by Multi-angle Thermal Infrared Remote Sensing Data[J]. Science in China (D), 2001, 44(4): 363—372
- [3] Li Z L, Stroll M P, Zhang R H, et al. Extract Soil and Vegetative Temperature by ATSR Data[J]. Science in China (E), 2000, 30 (Supplement): 27—38. [李召良, M. P. Stroll, 张仁华等. 利用 ATSR 分解土壤和植被温度的研究[J]. 中国科学(E), 2001, 30 增刊(8): 27—38.]
- [4] Xu X, Fan W J, Chen L F. Matrix Expression of Thermal Radiative Characteristics for an Open Complex [J]. Science in China (D), 2002, 45(7): 654—661.
- [5] Chen L F, Zhuang J L, Xu X, et al. The simulation of thermal Radiant Directionality of Continuous Vegetation on Using Monte Carlo Method[J]. Journal of Remote Sensing, 2000, 4(4): 261—265.

- [陈良富, 庄家礼, 徐希孺等. 用 Monte Carlo 方法模拟连续植被热辐射方向性[J]. 遥感学报, 2000, 4(4): 261-265.]
- [6] Li X W, Wang J F, Wang J D, Liu Q H. Multiangular Observation and Thermal Infrared Remote Sensing for Land Surface[M]. Chinese Science Publisher, 2001, 154-166.
- [7] Wang J F. The Study of Airborne Multi-angle TIR/VNIR Imaging System[C]. Proc. IWMMM-2, Ispra, Italy, 2000.
- [8] Zeng Q C. The Theoretical Problems of Infrared Remote Sensing of Atmosphere[M]. Beijing: Science Press, 1974, 71-77. [曾庆存. 大气红外遥测原理(M). 科学出版社, 1974, 71-77.]
- [9] Malinowski E R. Factor analysis in chemistry(M). New York, 1980, 80-81.
- [10] Fan W J, Xu X R. The Correlation of Multi-angle Thermal Infrared Data and the Choice of Optimal View Angles[J]. Science in China, Series D, 2003, 33(8): 809-815.
- [11] Wen S P. Applied Numerical Analysis[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001, 103-106. [文世鹏. 应用数值分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001. 103-106.]
- [12] Liu Q, Liu Q H, Xiao Q, et al. Study on Geometric Correction of Airborne Multiangular Imagery [J]. Science in China (D), 2002, 32(4): 299-306. [刘强, 柳钦火, 肖青等. 机载多角度遥感图像的几何校正(J). 中国科学(D), 2002, 32(4): 299-306.]

Retrieval of Plant and Soil Temperature by AMTIS Data

FAN Wen-jie¹, XU Xi-tu^{1,2}, WANG Fen-qin¹, LIU Qiang³

(1. Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871;

2. China Center of Remote Sensing and GIS of Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Now the remote sensing of LST is an important task of us. Components temperature retrieval is the main object of LST retrieval. If the emissivity or temperature of components is obviously different, the information of components' temperature can be extracted from the multi-angle radiance data. In this paper, we construct the matrix model of infrared radiance, analyze the correlation of $W_{K \times J}$, choose the optimal viewing angles and select the parameters that can be retrieved. Then based on data of the airborne sensor AMTIS developed in China, through geometrical and atmospheric correction, the plant and soil temperature in mixed pixels are separated using matrix retrieval method. The results and the error analysis show that the accuracy of retrieved soil temperature is good, but the result of retrieved plant temperature is not good enough.

Key words: AMTIS; Thermal infrared remote sensing; multi-angle; retrieval of component temperature