

# 黑河综合遥感联合试验中机载 WiDAS 数据的 的预处理方法

刘 强<sup>1</sup>, 肖 青<sup>1</sup>, 刘志刚<sup>1,2</sup>, 方 莉<sup>1,3</sup>, 彭菁菁<sup>1,3</sup>, 李 波<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学/中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;  
2. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 机载红外广角双模式成像仪(Wide-angle Infrared Dual-mode line/area Array Scanner-WiDAS)是黑河综合遥感联合试验中的主要机载传感器之一,它通过可见光到热红外波段的广角成像,获取地表二向反射和热辐射方向性信息,介绍了 WiDAS 数据的预处理关键算法及关键参数。WiDAS 传感器的可见近红外波段与中红外、热红外波段在探测器性能、空间分辨率和目标辐射特性方面都有显著差异,因此它们的预处理具有不同的算法。可见近红外波段的 CCD 相机用积分球定标,用简单的多项式形变函数进行波段间配准,用 6S 模型和实测气溶胶光学厚度进行大气校正。中红外、热红外波段的红外相机则用面元黑体定标,波段配准中采用了复合的形变函数和较为复杂的配准算法,大气校正采用 MODTRAN 模型和实测大气廓线。还介绍了从 WiDAS 标准预处理产品中提取目标的多角度观测的方法,这些信息为使用 WiDAS 数据产品开展定量遥感研究和应用提供参考。

**关键词:** WiDAS; 黑河试验; 多角度遥感; 红外遥感

**中图分类号:** TP 732; TP 75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2010)06-0797-08

## 1 引 言

地表反射和热辐射的方向性是定量遥感研究中必须考虑的问题,如果不能用模型合理地解释,只能把它当作噪声;反之,如果加以利用,则可以更好地提取地表结构、成分、状态等信息。在可见近红外波段,地表二向反射(BRDF)的模型和反演研究已经具有较好的基础<sup>[1]</sup>,对于 MODIS、MISR、POLDER、CHRIS 等传感器的卫星遥感数据已经成功应用 BRDF 模型提取叶面积指数、反照率、二向反射因子等地表特征参量<sup>[2-4]</sup>。在热红外波段,热辐射方向特性反映了地表组分温度信息,对于地表能量平衡和水热通量研究有着重要意义<sup>[5]</sup>。因为红外多角度遥感对于数据获取的同步性要求较高,所以数据资源仍然十分有限,目前用于红外辐射方向特性研究的卫星遥感数据只有 ATSR 系列传感器数据,该

传感器有沿轨方向的 2 个观测角度,空间分辨率约 1 km。机载传感器因为具有灵活、可控、空间分辨率高的特点,成为红外多角度遥感研究的主要数据源<sup>[6-7]</sup>。

“黑河综合遥感联合试验”(Watershed Allied Telemetry Experimental Research, WATER)(以下简称黑河试验)开展了对流域尺度生态、水文过程的遥感/地面同步观测<sup>[8]</sup>,其中,航空遥感起到连接地面观测和卫星遥感两个不同观测尺度的桥梁作用。光学和红外多角度遥感数据对于黑河试验区的水文过程研究有重要支持作用。根据试验目标以及现有的设备条件,我们设计开发了 WiDAS 传感器,该传感器为广角镜头成像,经过数据预处理后,可以从相邻图像的重叠区域提取同一地物的多角度信息。本文介绍了 WiDAS 数据的预处理和多角度信息提取方法。

收稿日期: 2010-09-10; 修订日期: 2010-11-13

基金项目: 中国科学院西部行动计划(二期)项目“黑河流域遥感-地面观测同步试验与综合模拟平台建设”(KZCX2-XB2-09); 国家 973 计划项目“陆表生态环境要素被动遥感协同反演理论与方法”(2007CB714400); 国家自然科学基金项目(40701121)。

作者简介: 刘强(1974-),男,副研究员,主要从事定量遥感和多角度遥感的研究。E-mail: liuqiang@irsa.ac.cn。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

2 WiDAS 传感器及其数据获取情况

WiDAS 由 4 个 CCD 相机、1 个中红外(MIR)相机和 1 个热红外(TIR)相机组成,由中国科学院遥感应用研究所和北京师范大学共同研制。具体的仪器参数见表 1。WiDAS 数据采集使用了面阵成像和多线阵组推扫成像两种模式同时进行<sup>[9]</sup>。线阵推扫获取的原始数据对于早期的数据分析非常有用,但是由于推扫数据的几何校正需要精确的成像

姿态参数,而黑河飞行试验中并没有同步获取。因此,本文介绍的数据处理流程主要针对面阵成像的数据。

WiDAS 传感器在黑河试验加强观测期内(2008 年 5~7 月)共完成 6 个架次的航空遥感飞行,分别是 5 月 30 日、5 月 31 日、6 月 1 日、6 月 29 日、7 月 7 日和 7 月 14 日。其中前 2 个架次仪器性能不稳定,获取的数据也没有做预处理,后 4 个架次获取数据质量较好,对主要测区数据已完成预处理。

表 1 WiDAS 主要性能参数  
Table 1 Specifications for WiDAS

	CCD 相机	MIR 相机	TIR 相机
像元数	1 392×1 040	320×240	320×240
波段设置	550 nm、650 nm、700 nm、750 nm	3~5 μm	7.5~13 μm
视场角/°	60		80
分辨率(航高 1 500 m)/m	1.2		7.9
可提取的观测角度	前向 30°到后向 30°之间 5 个观测角度		前向 40°到后向 40°之间 7 个观测角度

3 WiDAS 数据预处理方法

同其它遥感数据一样,WiDAS 数据的预处理涉及辐射定标、几何校正和大气校正 3 个方面。因为可见近红外波段与红外波段(包括 MIR 和 TIR)的成像器件、空间分辨率以及辐射传输原理方面存在显著的差异,所以二者的预处理方法有很大的不同。

3.1 辐射定标

3.1.1 CCD 相机定标

WiDAS 的可见近红外波段用 CCD 相机采集数据,共有 4 个光路,每个光路由 1 个滤光片、1 个镜头和 1 个面阵 CCD 相机组成。其中 CCD 相机的型号为 Basler scA 1400-19gm,采用了 40 nm 带宽的带通滤光片,中心波长分别为:550 nm、650 nm、700 nm 和 750 nm。

因为 CCD 相机表现出明显的、非均一的辐射响应,原始图像呈现中部亮、四周暗的特征,所以需要逐像元建立辐射定标公式,在辐射定标的同时也进行非均一性校正。在此,我们采用如下线性函数建立每一像元的输入辐亮度( $L_{i,j}$ )与其输出影像数值( $DN_{i,j}$ )之间的关系:

$$g \cdot t \cdot L_{i,j} = a_{i,j} \cdot (DN_{i,j} - d0) \tag{1}$$

其中: $i,j$  分别代表某像素在影像中的行、列号; $t$  为积分时间,单位为  $s$ ,黑河飞行试验中  $t$  设置为 0.0004  $s$ ;  $g$  为相机的增益,即放大倍数,试验中  $g$  设置为 200,即放大约 1.027 倍; $DN_{i,j}$  为在  $g,t$  条件下

影像中第  $i$  行第  $j$  列像素的灰度值; $d0$  为暗电流值,其对于不同像元以及不同  $g,t$  设置没有明显的差别,我们在这里把它当作常数; $a_{i,j}$  为待求的辐射定标系数。

为了求取辐射定标系数,我们在中国计量科学研究院开展了定标实验,采用大口径积分球作为稳定的均匀光源,通过依次开启不同数量的灯(1~16 盏)控制辐射亮度,在相机记录影像的同时,用光谱辐亮度计记录光源亮度,单位是  $W/(sr \cdot m^2 \cdot nm)$ 。最后利用最小二乘法计算各个像素所对应的辐射定标系数。实验结果表明,对于图像中间的大部分区域,去除暗电流之后的灰度值与光源辐亮度之间存在显著的线性关系。但是,影像四角的小部分区域由于被滤光片座遮挡,因此出现一定异常,在数据使用中对该部分区域需要注意。

3.1.2 红外相机定标

飞行试验中组成 WiDAS 传感器的 MIR 相机(型号为 AGEMA 550)和 TIR 相机(型号为 S60)本身是经过定标的设备,仪器输出为辐射亮温。但是一般来说红外探测器性能容易衰减,在使用过程中必须经常修正定标系数,另外我们给红外相机增加了广角镜头,也会影响仪器的辐射响应。因此,飞行试验之后,我们对 WiDAS 使用的 MIR 相机和 TIR 相机进行了实验室黑体定标。使用遥感科学国家重点实验室的黑体辐射校正源 Mikron 340,在实验室内控制黑体温度从 273 K 开始以 5 K 的温度等间隔

递增到 358 K, MIR 和 TIR 两相机对黑体成像。图 1 显示出室内测量的相机定标数据。

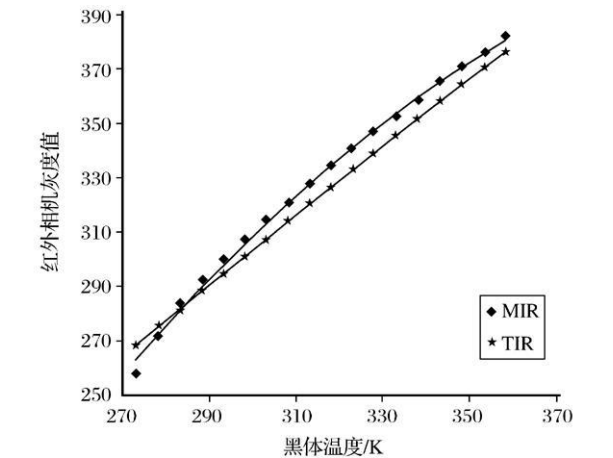


图 1 MIR 和 TIR 相机输出灰度值与黑体温度的散点图  
Fig. 1 Scatter plot of the blackbody temperature vs DN value of (MIR and TIR) thermal cameras' output

因为红外相机本身输出的是经过仪器内部定标和辐射均匀性校正的数据, 所以图像的均匀性比较好, 我们观察了野外自然场景图像和试验室内对大面元黑体成像的图像, 都没有发现辐射响应非均一的现象。因此我们对整幅图像采用统一的定标修正系数, 使用二次多项式拟合定标数据, 拟合公式如式 (2), 其中  $T_{\text{obs}}$  为探测器输出值,  $T$  为定标后的亮温度, 单位是 K。

$$T = B_0 + B_1 \cdot T_{\text{obs}} + B_2 \cdot T_{\text{obs}}^2 \tag{2}$$

表 2 MIR 和 TIR 波段相机定标系数

Table 2 Calibration coefficients of MIR and TIR bands			
	$B_0$	$B_1$	$B_2$
MIR 相机	287.597	- 0.58336	0.002020
TIR 相机	86.196	0.62729	0.000254

3.2 几何校正

WiDAS 的 6 个波段分别具有单独的成像光路, 这就决定了其图像几何关系的复杂性, 再加上 WiDAS 飞行试验中并没有配套的姿态测量数据, 因此 WiDAS 数据的自动几何校正是一个很大的挑战。另一方面, WiDAS 的画幅式成像获取的图像具有相对稳定的内部几何关系, 因此可以用传统的影像匹配以及摄影测量方法来开展 WiDAS 的几何处理。我们首先采用室内测定的几何定标数据进行相机镜头引起的几何畸变的校正, 然后对同一时刻获取的不同波段数据进行配准, 最后把波段间配准的图像与几何校正底图进行匹配, 投影后完成几何校正。

3.2.1 相机的几何定标

WiDAS 采用广角镜头成像, 引起图像的畸变相对较大, 如果忽视图像畸变会对后期的配准和校正产生负面影响。因此, 在飞行试验结束之后, 我们分别在北京师范大学和中国科学院遥感应用研究所对 4 个 CCD 相机和 2 个红外相机的图像畸变进行了测定。测定方法是对具有特定纹理的图案成像, 提取图像中的标志点, 然后进行畸变模型参数的解算。畸变模型表述为:

$$\begin{aligned} \text{col} &= \text{col}_0 + x + \Delta x \\ \text{lin} &= \text{lin}_{\text{max}} - \text{lin}_0 - (y + \Delta y)/k_y \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \Delta x &= x(k_1r^2 + k_2r^4) + p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2xy \\ \Delta y &= y(k_1r^2 + k_2r^4) + p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1xy \\ r^2 &= x^2 + y^2 \end{aligned} \tag{4}$$

其中: (col, lin) 为像点相对于左上角的行列号(从 0 起), (col<sub>0</sub>, lin<sub>0</sub>) 为主点坐标(相对于左上角), lin<sub>max</sub> 是图像的总行数, (x, y) 为像点相对于主点的坐标, Y 轴方向向上, 单位是像素,  $k_y$  是像元在 X 方向瞬时视场与 Y 方向瞬时视场的比值,  $k_1$  和  $k_2$  是径向畸变系数,  $p_1$  和  $p_2$  是切向畸变系数。

3.2.2 波段间的配准

WiDAS 原始数据的 6 个波段相互之间分辨率有显著差异, 视场不完全一致, 成像时刻也有细微的差别, 所以几何校正的首要工作是进行波段之间的配准。我们以波段 1(550 nm) 为标准, 其它 5 个波段向其配准并重采样到相同分辨率。自动配准采用 Harris 算子提取具有丰富纹理信息的特征点, 然后用灰度相关算子进行同名点匹配。因为这是影像匹配的常用算法, 这里不做详细介绍。WiDAS 处理算法中有特色的是纠正图像用的形变函数的建立方法。

对于波段 2、波段 3 和波段 4, 它们与波段 1 同样都是 CCD 相机获取的, 获取时通过硬件触发器保证同步曝光。在拍摄目标是远景的条件下, 可认为它们波段间配准的形变函数是固定的, 具体来说, 是镜头畸变函数与一个多项式函数的函数积。这个多项式函数可通过从不同时刻获取的图像中提取的大量同名点联合求解来估计。

对于波段 6(即 TIR), 其图像是由 TIR 相机获取的, 采样频率为 0.5 s/ 帧, 与 CCD 相机没有硬件同步。因此只能挑选与波段 1 获取时刻最接近的一帧 TIR 图像来进行波段间的匹配, 二者之间存在的时差在 0.25 s 以内。因为存在时差, 其间飞机运动造成了传感器位置、姿态的变化, 所以波段 6 与波段

1 之间配准的形变函数不是固定的,每一帧图像都需要单独建立形变函数。但是,估算一个复杂的形变函数需要大量同名点,并不是每一帧图像中都能够成功找到数量足够多且分布均匀的同名点来建立形变函数。特别是由于 550 nm 波段与 TIR 波段的分辨率差别悬殊,地物波谱特征不同,所以通常在一帧图像上能找到的同名点不多。为了解决这个问题,我们把形变函数分解为镜头畸变函数、线性形变函数和多项式形变函数三分量。其中线性函数代表了由于传感器位置、姿态的变化引起的图像平移和旋转,是每一帧都变化的,通过单帧图像匹配的结果估计。而多项式函数则是固定不变的,用于校正除了镜头畸变以及平移、旋转之外的形变,通过手工挑选的同名点数量、分布较好的多帧图像联合求解进行估计。这样就降低了逐帧建立形变函数时对同名点的要求。对于少数同名点太少、甚至不能求解线性形变函数的帧,只能用其相邻帧的同名点来估计其形变函数。

对于波段 5(即 MIR),其图像与 TIR 图像波谱特征非常相近,图像相关性好,所以先把 MIR 图像与 TIR 图像匹配,通常可以获得数量多和分布较好的同名点,进而估计出波段 5 向波段 6 配准的多项式函数。因此,我们设计的波段 5 向波段 1 配准的形变函数就是波段 5 的镜头畸变函数、波段 5 向波段 6 配准的多项式函数、波段 6 向波段 1 配准的形变函数三者的函数积。

图 2 是 WiDAS 系统 6 个波段间配准的结果图,该图像对应的地点是张掖一大满一花寨子飞行区的盈科灌区绿洲站,获取时间为 2008 年 7 月 11 日。显示的图像实际上是 WiDAS 1B 级数据产品的快视图,左上角图例显示了窗口分布情况,①区为 CCD 相机 650 nm、750 nm 和 550 nm 3 个波段的假彩色合成图像;②区为 TIR、550 nm 和 MIR 图像的假彩色合成图像;③区和④区分别为 MIR 和 TIR 图像。①区中部☆号指示的位置为盈科灌区绿洲站。

### 3.2.3 校正到地理坐标

为了实现 WiDAS 数据的全面几何校正,以几何精纠正后的 2.5 m SPOT5 图像为参考底图,将 WiDAS 数据波段 1(550 nm)图像与其配准。因为实验区基本是平原,通过飞机上与成像同步获取的 GPS 数据,代入粗略估算的成像姿态,可以初步估算 WiDAS 图像的大致地理坐标。以此为初始条件,利用自动配准技术实现 WiDAS 图像与参考底

图配准。基本可实现 WiDAS 与参考底图的全自动匹配,误匹配率很低,这些少量的误匹配可通过人工目视检验并进行纠正。配准后的 WiDAS 图像被投影到地理坐标系,然后经过多条航带图像的镶嵌形成完整的测区图像。

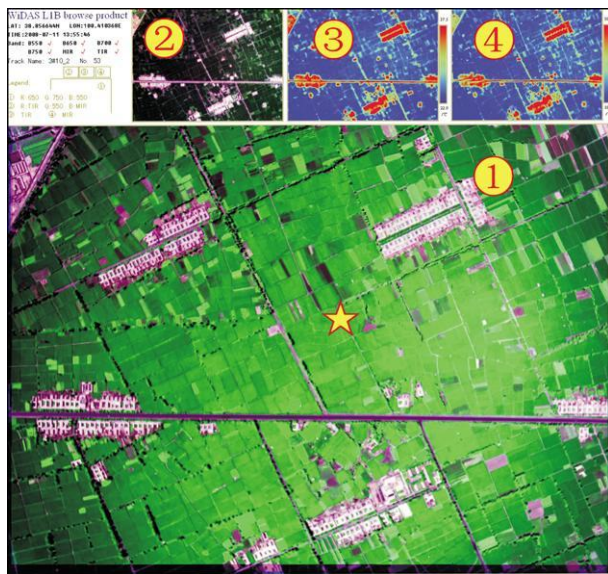


图 2 盈科灌区绿洲站 WiDAS 1B 级产品的快视图(7 月 11 日)

Fig.2 The quick view image for WiDAS level 1B product

图 3 是盈科灌区绿洲站及周边地区多景几何校正后 WiDAS 图像的镶嵌图,图像中部☆号指示的位置为盈科灌区绿洲站。数据为 2008 年 6 月 1 日飞行数据,因为当时玉米的叶面积指数尚小,玉米地光谱特性与裸土相似,为灰色,左下角大片绿色区域是果园,右上角大片绿色区域是冬小麦。

### 3.3 大气校正

WiDAS 数据大气校正就是为了消除大气影响,在可见近红外波段求取地表反射率,在中红外和热红外波段求取地表辐射亮温。一般来说,大气辐射传输模型已经比较成熟,大气校正的主要困难在于获得与遥感图像配套的大气参数。黑河试验中周密设计了对大气参数的同步测量方案,每次飞行试验都用 GPS 探空气球测量试验区的大气廓线,并通过太阳分光光度计(CE318)观测获取大气气溶胶信息。虽然 WiDAS 飞行试验的飞行区比较大,飞行时间也比较长,地面试验获取的大气参数不一定能与飞行数据完美配套。但是,相对其它方法而言,地面同步试验提供的大气参数可信度最高。因此 WiDAS 数据处理流程中采用与飞行时间最为接近的大气廓线和气溶胶光学厚度测量数据作为大气辐射传输模型的输入参数。





图3 盈科灌区绿洲站及周边地区多景 WiDAS 2C 级产品的镶嵌图(R: 650 nm, G: 750 nm, B: 550 nm)

Fig. 3 A mosaic image of multiple WiDAS level 2C product images around Yingke station

### 3.3.1 可见近红外波段的大气纠正

大气辐射传输模型 6S<sup>[10]</sup> 原理明晰、程序小巧、使用方便, 是可见近红外波段大气纠正的常用模型, 对于机载传感器的入瞳辐射, 其辐射传输公式为:

$$\bar{\rho}^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) + \frac{\rho}{1 - S\rho_s} T(\theta_v) T(\theta_s) \quad (5)$$

其中:  $\bar{\rho}^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)$  为机载传感器的入瞳辐射对应的表观反射率,  $\rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)$  是大气程辐射的等效反射率,  $\rho$  为朗伯假定下的地表反射率,  $T(\theta_s)$  为大气层顶到地面的大气透过率,  $T(\theta_v)$  为地面到传感器高度的大气透过率,  $S$  为大气层向下的半球反照率。以上参数都可以从 6S 模型的输出参数中读取。我们认为一条航线中大气参数都是相同的,  $T(\theta_s)$  和  $T(\theta_v)$  仅随太阳、观测天顶角改变,  $\rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)$  随太阳、观测天顶角和相对方位角改变。于是对于所有 WiDAS 数据可能取值的太阳、观测天顶角以  $2^\circ$  间隔离散化、相对方位角以  $5^\circ$  间隔离散化, 建立大气辐射传输参数以及相应的纠正系数的查找表。对于每一帧每一像元的 WiDAS 数据, 根据太阳、观测角度查表并用线性插值法得到大气辐射参数, 根据式(4)纠正传感器高度的表观反射率成为地表反射率。

### 3.3.2 中红外和热红外波段的大气纠正

在中红外和热红外波段, 地表辐射是由地表温度、发射率以及环境辐射决定的。温度和发射率的分离是定量遥感反演中的难题, 作为标准化的数据预处理, 我们不做温度和发射率分离, 仅仅从数据中去除

大气的影。这里采用简化的大气辐射传输公式:

$$L_{\text{plane}}(z, \theta_v) = \tau(z, \theta_v) L_{\text{grd}}(\theta_v) + L_{\text{atm}\uparrow}(z, \theta_v, \theta_s, \phi) \quad (6)$$

其中:  $L_{\text{plane}}(z, \theta_v)$  为传感器入孔处辐射亮度, 由红外相机获取的亮温数据经过辐射定标后根据普朗克公式和 WiDAS 的波谱响应函数计算;  $\tau(z, \theta)$  为宽波段的从地面到传感器高度的大气透过率;  $L_{\text{atm}\uparrow}(z, \theta_v, \theta_s, \phi)$  为宽波段大气的程辐射, 由大气自身的热辐射和大气对太阳辐射的散射共同构成;  $L_{\text{grd}}(\theta_v)$  为宽波段地面的辐射亮度, 由地面自身的热辐射和地面反射的大气下行辐射两部分组成。

$$L_{\text{grd}}(\theta_v) = \varepsilon L_B(T) + (1 - \varepsilon) L_{\text{atm}\downarrow} \quad (7)$$

其中:  $L_B(T)$  为地表温度  $T$  对应的黑体辐射,  $\varepsilon$  为地表宽波段发射率,  $L_{\text{atm}\downarrow}$  为大气下行辐射, 包括散射辐射和(MIR 波段的) 太阳直射辐射。在大气纠正过程中, 实际就是利用 Modtran 大气辐射传输模型 (<http://www.modtran.org>) 求得大气的透过率  $\tau(z, \theta)$  和程辐射  $L_{\text{atm}\uparrow}(z, \theta_v, \theta_s, \phi)$ , 进而计算出地表的辐射亮度  $L_{\text{grd}}(\lambda)$ 。Modtran 的直接输出只有传感器的入瞳辐射亮度, 并没有单独给出透过率和程辐射。为了获得这两个量, 需要分别模拟传感器在飞行高度和地表高度两个位置对高温和低温物体探测的入瞳辐射亮度值, 带入式(5), 经过简单的解方程, 透过率可由下式计算:

$$\tau = \frac{L'_{\text{toa1}} - L_{\text{toa1}}}{L'_{\text{toa2}} - L_{\text{toa2}}} \quad (8)$$

其中:  $L'_{\text{toa1}}$ 、 $L_{\text{toa1}}$ 、 $L'_{\text{toa2}}$ 、 $L_{\text{toa2}}$  分别是表3中的4种设置获得的传感器辐射亮度值。

程辐射可由下式计算:

$$L_{atm\uparrow} = L_{toa1} - \tau \times L_{toa2} = L_{toa1} - \tau \times L_{toa2} \quad (9)$$

实际处理过程中,为了加快计算速度,采用查找表储存 Modtran 计算的透过率和程辐射,需要说明的是,TIR 波段的透过率和程辐射都是与方位角无关的,而 MIR 波段的程辐射则包含了大气反射的太阳辐射,因此与太阳、观测方位角有关。

表 3 计算大气透过率和程辐射时 ModTran 的设置方式  
Table 3 Settings for Modtran simulation in order to calculate atmosphere transmission and path radiance

模拟顺序	1	2	3	4
传感器高度	飞行高度	飞行高度	地表高程	地表高程
地表温度 /K	300	400	300	400
传感器观测值	$L_{toa1}$	$L_{toa2}$	$L_{toa2}$	$L_{toa2}$

4 WiDAS 数据产品及使用方法

4.1 WiDAS 预处理产品及格式

根据 WiDAS 数据的特点以及预处理的过程,我们设计了几个级别的预处理数据产品:0 级产品是经过编目整理后的传感器原始数据;1A 级产品是在 0 级产品的基础上,增加辅助参数,包括辐射定标系数,波段间配准的形变函数等;1B 级产品是对 1A 级产品中的图像数据进行辐射定标、配准和重采样的多波段图像;2A 级产品是在 1A 级产品的基础上,进一步增加辅助参数,包括将多波段图像校正到地理坐标系的校正系数,以及面阵成像时刻的相机位置和姿态;2B 级产品是对 1B 级产品进行几何校正,投影到地理坐标系;2C 级产品是 2B 级产品大气纠正后的结果。

需要说明的是,TIR 和 MIR 波段的相机的视场角大于 CCD 相机的视场角;相应的,其每帧图像覆盖范围大于 CCD 图像;另外,红外相机的成像频率也高于 CCD 的成像频率。前面介绍的预处理流程中,2B 和 2C 级产品是从 1B 级(即波段间配准)产品生成的,在波段间配准的过程中,红外相机图像只保留了与 CCD 图像交集的部分,信息损失较多。因为 WiDAS 以红外波段的多角度观测为主要特色,我们希望得到观测角度数更多,观测角度更大的红外波段数据,所以还生成了仅包含单一红外波段的 2B\_TIR/2B\_MIR 和 2C\_TIR/2C\_MIR 级产品。生产流程是在测区的镶嵌图像完成后,以 TIR(或 MIR)波段 7.5 m 分辨率的镶嵌图作为几何校正底图,直接从 1A 级产品中提取单一 TIR(或 MIR)波

段的完整图像与几何校正底图自动匹配,经过几何校正和大气校正后生成 2B\_TIR 和 2C\_TIR 级产品,它们是 0.5 s/帧,空间分辨率 7.5 m,最大观测角度达到约 40°。

WiDAS 各级预处理产品的图像数据格式均为 ENVI 标准格式,即按 BSQ 顺序排列的二进制数组,加上一个文本格式的头文件,其中包括行列数、波段数、投影类型和投影参数等信息。各波段数据的 DN 值转换系数、物理量内容、物理量单位等信息都以描述文字的形式写在头文件之中。推荐用户使用 2C 级数据,它是把辐射定标和波段间配准、几何精校正、大气校正应用于图像数据后生成的直接可使用的数据产品,各种参数和说明均以文本格式给出,使用起来简单方便。1B、2B 级产品目前主要以快视图形式发布,用于快速检索 2C 级数据。如果用户需要自己做几何精校正和大气校正,也可使用完整的 1B 或 2B 级数据产品。而 1A 和 2A 级产品则保持了传感器输出的原始状态的数据,各级预处理仅保存了辅助参数而没有改变图像。1A 和 2A 级产品主要是为了将来重新处理或升级数据而保存的中间结果,其辅助参数格式较复杂,这里不做具体介绍。

4.2 WiDAS 数据提取多角度信息的方法

WiDAS 预处理产品仍然是普通的多波段图像,要得到地物 BRDF 和热辐射方向性信息,需要从多景图像中提取同一地面目标的多次观测,这些多次观测就构成了该目标的多角度观测数据集。从 WiDAS 预处理产品中提取多角度信息需要编程实现,伴随 WiDAS 数据产品提供了提取多角度信息的例程,需要使用多角度信息的用户可以参考例程建立自己的程序,或者直接改写例程添加用户自定义的分析或处理模块。

这个名为“WidasBrdfSample”的例程从多景 2C 产品中提取地物的 BRDF,并使用 Ross-Thick / Li-Sparse-Reciprocal 核驱动模型<sup>[11]</sup>逐波段拟合 BRDF,然后保存拟合得到的核系数。提取 BRDF 首先需要计算每一景图像的每一个像元的太阳/观测角度。太阳天顶角和太阳方位角是由像元的经纬度和成像时间决定的,很多软件都能够计算,这里就不再介绍。观测天顶角和观测方位角是由像元的地面三维坐标与成像时刻传感器的三维坐标共同决定的。因为 2C 产品是几何精纠正后投影到地理坐标系的栅格图像,图像左上角坐标和像元分辨率记录在头文件中,所以每个像元的地理坐标都可以方便

地计算出来,像元对应的地面高程通过 30 m 分辨率的 DEM 获取。2C 产品的头文件中记录了这一景图像成像时刻传感器位置(包括地理坐标和高程)和姿态,这是在每一景数据与几何校正底图匹配的同时把匹配得到的控制点代入光束法平差算法计算的,位置精度约在 1 m 以内。有了观测目标和传感器的三维坐标后,观测天顶角和观测方位角计算公式如下:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{(x_g - x_p)^2 + (y_g - y_p)^2}}{\sqrt{(z_g - z_p)^2}} \quad (10)$$

$$\phi = \begin{cases} \cos^{-1} \frac{x_g - x_p}{\sqrt{(x_g - x_p)^2 + (y_g - y_p)^2}} & \text{当 } y_g - y_p \geq 0; \\ 2\pi - \cos^{-1} \frac{x_g - x_p}{\sqrt{(x_g - x_p)^2 + (y_g - y_p)^2}} & \text{当 } y_g - y_p < 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中:  $x_g$ 、 $y_g$ 、 $z_g$  是像元中心点的地面三维坐标;  $x_p$ 、 $y_p$ 、 $z_p$  是成像时刻传感器光学中心的三维坐标。

提取多角度信息的另一方面是从不同景图像中找到观测同一地面目标的像元。例程要求用户输入感兴趣区域的图像,这是具有 UTM 地理坐标的 ENVI 格式的任何一景遥感图像或者分类图,例程通过该图像获知感兴趣区域的范围以及用户需要的分辨率。然后例程还要求用户输入覆盖感兴趣区域的所有 2C 级产品的文件名列表。对于感兴趣区域的某一个像元,例程根据其中心的地理坐标逐一比较列表中所有图像文件,判断这个坐标点是否在图像范围内,以及各波段的数据是否完整,如果是,则把这些波段数据以及太阳/观测角度保存到内存中并传递给分析和使用 BRDF 数据的函数。

需要说明的是其中存在尺度转换的问题。在 BRDF 提取时,例程首先比较用户输入的感兴趣区图像的分辨率  $R$  与 2C 级产品分辨率  $R_0$  的大小,如果  $R < 2 \times R_0$ , 则不做降尺度处理,直接用双线性插值法从 2C 级产品图像中提取目标像元中心点的反射率(或辐射亮温)值。如果  $R > 2 \times R_0$ , 说明用户需要的分辨率显著低于 2C 级产品的分辨率,这时需要做降尺度处理。降尺度的方法是在以目标像元的中心点为中心布置  $N \times N$  个点的采样点阵,点阵的间距等于 2C 级产品的分辨率,覆盖范围大致等于目标像元的视场大小,因此  $N = \text{int}(R/R_0)$ 。每一个采样点的反射率(或辐射亮温)值通过双线性插值法计算。降尺度反射率(或辐射亮温)值就等于这  $N \times N$  个采样点的反射率(或辐射亮温)值的平均,目

前例程中采用简单的算术平均,用户也可根据具体的情况采用像元的空间响应函数加权求平均。

## 5 结 语

WiDAS 作为黑河综合遥感联合试验中的一个主要机载遥感传感器,通过飞行试验获取了大量数据,这些数据需要经过辐射定标、几何校正和大气校正等预处理,才能用于定量遥感研究。本文针对 WiDAS 数据的特点,介绍了 WiDAS 数据预处理流程中的关键算法和关键参数。了解这些内容有助于分析和解决使用 WiDAS 数据中遇到的问题。

WiDAS 是黑河试验中第一次运行的原型传感器,虽然已经生产了数据预处理产品,且有了一些初步的分析应用,但是,无论是传感器硬件还是数据处理软件都还有很多需要改进之处。就数据处理软件而言,辐射定标部分仅实现了最基本的功能,对于与硬件有关的更为复杂的定标问题尚未考虑;波段配准部分由于红外相机与 CCD 相机成像不同步,虽然通过图像特征进行了匹配,但是匹配效果因图像而异,存在不确定性;几何校正到地理坐标的过程中假设地面是平面,对于有地形区域或者树木等三维结构复杂的目标,校正精度大幅度降低。更多的关于 WiDAS 数据质量问题以及存在于多角度遥感应用中的深层次问题都有待更多的用户分析使用 WiDAS 数据后才能发现。

致谢:感谢黑河综合遥感联合试验中气象水文观测组提供了大气廓线,地面观测组提供了大气气溶胶参数和地表温度同步定标数据,北京师范大学张吴明老师做了 CCD 相机几何畸变参数解算,中国科学院遥感应用研究所唐婷研究员及课题组提供几何精纠正的 SPOT5 数据作为参考底图。

## 参考文献(References):

- [1] Li Xiaowen, Wang Jindi. Optical Remote Sensing Model and Parameterization of Structure of Vegetation Canopy[M]. Beijing: Science Press, 1995. [李小文,王锦地.植被光学遥感模型与植被结构参数化[M].北京:科学出版社,1995.]
- [2] Fan W J, Xu X R, Liu X C, et al. Accurate LAI Retrieval Method based on PROBA/CHRIS Data[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(8): 1499-1507.
- [3] Schaaf C, Gao F, Strahler A H, et al. First Operational BRDF, Albedo and Nadir Reflectance Products from MODIS[J]. Remote Sensing Environment, 2002, 83: 135-148.
- [4] Leroy M, Deuze J L, Breon F M, et al. Retrieval of Atmospheric Properties and Surface Bidirectional Reflectances over

- Land from POLDER/ADEOS [ J ]. Journal Geophysical Research, 1997, 102: 17023-17037.
- [ 5 ] Menenti M, Jia L, Li Z L. Multiangular Thermal Infrared Observations of Terrestrial Vegetation[ C ]//Liang Shunlin eds., Advances in Land Remote Sensing: System, Modeling, Inversion and Application. Springer Verlag, 2008, 1: 51-93.
- [ 6 ] Li Xiaowen, Wang Junfa, Wang Jindi, *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遥感 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2001. ]
- [ 7 ] Wang F. An Airborne Multi-angle TIR/VNIR Imaging System[ J ]. Remote Sensing Reviews, 2000, 19( 1-4 ): 161-170.
- [ 8 ] Li X, Li X W, Li Z Y, *et al.* Watershed Allied Telemetry Experimental Research [ J ]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114( D22103 ): 11590.
- [ 9 ] Fang Li, Liu Qiang, Xiao Qing, *et al.*, Design and Implementation of Airborne Wide-angle Infrared Dual-mode Line/area Array Scanner in Heihe Experiment [ J ]. Advances in Earth Science, 2009, 24( 7 ): 696-704. [ 方莉, 刘强, 肖青, 等. 黑河试验中机载红外广角双模式成像仪的设计及实现 [ J ]. 地球科学进展, 2009, 24( 7 ): 696-704. ]
- [ 10 ] Vermote E F. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35( 3 ): 675-686.
- [ 11 ] Lucht W, Schaaf C B, Strahler A H. An Algorithm for the Retrieval of Albedo from Space Using Semiempirical BRDF Models[ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38( 2 ): 977-998.

## Image Processing Method of Airborne WiDAS Sensor in WATER Campaign

LIU Qiang<sup>1</sup>, XIAO Qing<sup>1</sup>, LIU Zhigang<sup>1,2</sup>,  
FANG Li<sup>1,3</sup>, PENG Jing-jing<sup>1,3</sup>, LI Bo<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;  
2. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;  
3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China )

**Abstract:** WiDAS( Wide-angle Infrared Dual-mode line/area Array Scanner) is one of the major airborne sensors flew in the WATER( Watershed Allied Telemetry Experimental Research) field campaign. It acquires multi-angular information about surface reflectance and emission anisotropy through wide-angle imaging. This paper describes the algorithm and key parameters for WiDAS data processing. The detectors, image resolutions, and object spectral characteristics are much different between WiDAS VNIR bands and TIR/ MIR bands. So, we adapt different data processing algorithm for VNIR bands and TIR/ MIR bands. In VNIR bands, the CCD cameras are calibrated with integration sphere; images in different bands are aligned with simple warp function; atmosphere correction is performed with 6S model and measured aerosol optical thickness. In TIR/ MIR bands, the IR cameras are calibrated with blackbody; image alignment have to use compound wrap function and more complex matching algorithm; and atmosphere correction is performed with MODTRAN model and measured atmosphere profile. The method to extract multiangular observations of ground object from standard WiDAS data products is also described. This paper can be informative when using WiDAS data in quantitative researches.

**Key words:** WiDAS; WATER; Multi-angular remote sensing; Infrared remote sensing