

多角度遥感及其航空成像仪

汪骏发 高晓萍 陈志峰 肖金才 杨帆

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要 从多角度遥感的原理出发,介绍了机载多角度光谱成像仪的设计思想和设计方法,通过航空飞行试验,验证了系统的设计思想,并获取了高性能的多角度多光谱图像数据。

关键词 多角度,多光谱,机载成像仪,BRDF.

REMOTE SENSING IN MULTI-ANGLE AND AIRBORNE IMAGING SYSTEM

WANG Jun-Fa GAO Xiao-Ping CHEN Zhi-Fen
XIAO Jin-Cai YANG Fan

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract From the concept of multi-angle remote sensing, the method of designing an airborne multi-angle TIR/VNIR imaging system (AMTIS) was introduced. The design was validated by flight experiments. Some useful high-quality multi-angle and multi-spectra image data were obtained.

Key words multi-angle, multi-spectral, airborne remote sensor, BRDF.

引言

无论大气或地表,都不是理想的均匀层或朗伯表面,都有垂直方向上的变化和空间结构,因而其反射的方向性是其材料波谱特征和空间结构特征的函数^[6].传统的单一方向遥感只能得到地面目标的一个方向的投影,缺乏足够的信息来同时推断一个像元的主要材料波谱和空间结构,从而使定量遥感非常困难.地面目标的三维空间结构信息的获取,是定量遥感研究要解决的问题.与单一方向遥感相比,多角度对地观测通过对地面固定目标多个方向的观察,可得到更丰富的目标观察信息,因而有希望提取较单一方向观测更为详细可靠的地面目标的三维空间结构参数,为定量遥感提供新的途径.

1 多角度遥感

从对地多角度观测数据中提取地面目标的空间结构等参数,机理上主要依赖于地物本身的二向性反射特性.二向性反射是自然界中物体表面反射光的基本宏观现象,即反射不仅具有方向性,这种方向

还依赖于入射的方向^[4].人们早已观察到这种现象,从而发展了二向反射比、二向反射比因子等不同概念.70年代初对物体表面二向性反射分布函数(BRDF)研究,迄今才有最完善的定义.航天遥感事业的发展,使BRDF模型的研究在近20年来取得了长足的进展,主要是由于原来关于表面反射的理想化假定和近似(镜面反射、朗伯反射)不再能满足对地观测的需要^[5],如宽视场传感器由于观察方向的差异能产生极强的同物异谱现象,卫星过顶时刻特定太阳高度角时观测到的反射率无法外延到其它太阳高度角,因而无法精确估计全日的平均反射率等等.

假定模型有 K 个结构参数, L 个组分材料,对单一波段来说,就有 $K+L$ 个参数.在反演时,从一个观测值及一个方程,无法解出 $K+L$ 个未知数,这是不言而喻的.如果波段数大大增加 N 时,前向模型的参数量增至 $K+NL$,而观测值数据增至 N 个,此时即使只有一种材料的波谱未知,未知数仍有 $K+N$ 个,仍然无法定解,因而只能用一定的空间分布统计规律来估计^[7].而多角度遥感的希望即在于:从 M 个方向采样,在 N 个波段上可获得 $M \times N$ 个

观测值,不难实现 $M \times N > K + NL$ 。30多年来,人们一直在探索利用热红外遥感来快速精确地获取区域和全球尺度上的陆地表面温度,然而热红外遥感与可见光近红外遥感相比,不仅要考虑地表对环境辐照的反射,更要考虑地表本身的热辐射,而热辐射本身就是地表温度和发射率这两个变量的函数,与海洋表面温度遥感相比,陆地表面则具有材料、结构和温度上更大的空间多变性,因而海洋遥感中一些简单假定和有效算法难以应用于陆地温度遥感。

物体表面热发射率的经典定义要求该表面具有均一的温度,用来与同一表面温度黑体的热辐射相比较,但对热红外遥感,大多数地表像元很难满足这一同温条件,多年来非同温表面的有效或等效发射率的概念在被广泛使用中一直混淆不清,直到近期才有一些试图明确定义这一概念的认真探讨,已有的一些定义如 ϵ 发射率(复合发射率)或 r 发射率(反射发射率)并不能满足目前遥感真实表面温度的需要。

对于地表热辐射的方向性,也只能从亚像元结构和组分温度、波谱这一尺度上加以解释,Kimes从几何光学的角度,合理地解释了植被冠层垂直温差为 4.1°C 时,不同观测方向亮温相差 2°C 的现象;Dozier用积雪的BRDF模型,引用方向性基尔霍夫定律,成功地解释了积雪热辐射的方向性^[3],然而,方向性基尔霍夫定律仅适于同温表面,因此迄今只有有限的应用,Kimes的方法则刚好相反,在植被垂直温差大时也许够精确,但当假定所有叶片近似同温时,则会给出冠层亮温各向同性、等效发射率与单叶相同的结论,与大量观测不符,这是由于Kimes忽略了多次散射的缘故,为此,需要对非同温表面建立新的模型。

2 机载多角度多光谱成像仪的设计

2.1 系统技术指标

根据项目要求,建立一套机载多角度多光谱成像仪实验样机,以获取9个角度、可见、近红外和热

红外3个波段的机载多角度多光谱图像,主要用于农作物、植被和地表温度特性分析等^[1],以填补我国高空间分辨率多角度图像的不足,表1给出了机载多角度多光谱成像仪技术指标^[6]。

2.2 系统结构

机载多角度多光谱成像仪系统由摆动装置及其控制电路、探测器件及其数据采集和记录系统等组成,探测器件中,可见近红外采用硅面阵CCD相机,热红外采用由室温面阵焦平面器件构成的热像仪,扫描头部如图1所示,由摆动支架、相机座、驱动电机等组成,3台相机呈一字型排列,以减小系统的几何尺寸和对飞机窗口的要求。

2.3 速高比及像移补偿

根据应用需要,系统的瞬时视场为 0.5mrad ,总视场为 20° ,在4000m高空,机下点 0° 方向(nadir)地面总视场约为1400m,如飞机飞行速度为 250km/h ,则每秒钟飞机飞过69m,为保证30%的重叠率和9个角度的图像信号及保证摆动装置可靠工作,并为满足速高比要求,相机摆动的周期为14s,正扫

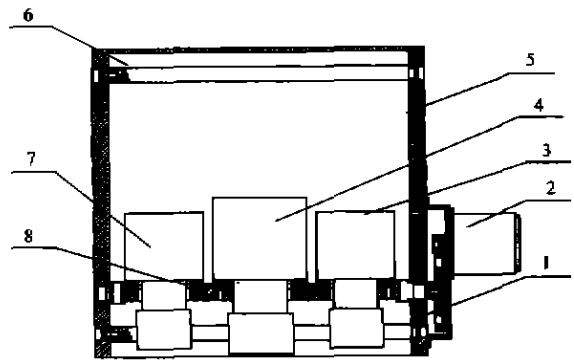


图1 扫描头部机械结构示意图

- 1—齿轮减速箱, 2—步进电机,
3—近红外相机, 4—热红外相机,
5—龙门架, 6—横梁,
7—可见相机, 8—相机基座

Fig. 1 Diagram of scanner head

- 1—gearbox, 2—step motor,
3—NIR camera, 4—thermal camera,
5—main frame, 6—crossbeam,
7—visible camera, 8—camera bench

表1 机载多角度多光谱成像仪系统技术指标

Table 1 Specification of AMTIS

波段	像元数	瞬时视场	总视场	NE $\Delta\rho$	NEAT	观察角度
可见	1024 × 1024	0.5mrad		0.3%		9
近红外	1024 × 1024	0.5mrad	20°	0.5%		(±45°范围内可调)
热红外	320 × 240	1mrad			0.2K	

11s, 回扫 3s, 曝光的间隔为 1.3s.

按照基本飞行参数, 飞机的飞行高度为 4000s, 飞行速度为 250km/h, 速高比为 0.06, 扫描周期为 14s, 回扫为 3s, 正扫周期为 11s. 在正扫周期, 如匀速摆动, 摆动的角速度为 6.9°/s, 而飞机的飞行速度为 69.44m/s, 其等效角速度为 1.3°/s, 可见/近红外波段的瞬时视场仅有 0.03°, 如相机的曝光时间为 0.01s, 1/5 像移所容许的等效角速度误差小于 0.6°/s. 为解决像移问题, 采取的措施是: (1) 在扫描方向上, 采取由前向后向扫描, 使飞机飞行所造成的前向像移与电机摆动时后向像移部分抵消; (2) 采用变速度扫描, 尽量保证在曝光时相机对于飞机的摆动角速度接近飞机飞行的相对角速度 1.3°/s, 等效角速度误差保持在 ±0.6°/s 以内^[6].

2.4 控制电路

控制电路包括电机控制和相机的曝光控制. 电机控制的任务是控制和驱动步进电机带动摆动装置从前向 45° 向后向 45° 摆动, 此时相机工作, 然后快速回扫. 由于在本系统中电机采用了步进电机, 摆过的角度可以通过光电码盘来获取, 也可以通过发给步进电机的脉冲计数获取. 当然, 摆动的角度和速度主要通过脉冲计数来控制, 光电码盘起验证作用, 摆动的速度与飞机飞行的速高比和系统的工作方式相关联.

控制电路主要由逻辑电路、储存器和缓冲器组成(如图 2 所示). 控制电路根据设置的速度指令通过步进脉冲信号发给电机驱动器, 码盘用于检验转角的准确性. 电机控制电路还产生相机同步信号, 控制相机同步工作. 控制电路的核心部分采用现场可编程逻辑器件完成, 这样可以提高电路的集成度, 并便于修改参数.

在机载多角度多光谱成像仪系统中有 3 台相机需要同时曝光、同时采集图像数据, 以保证 3 个波段的图像有较好的配准精度. 同时, 相机的曝光受到摆动装置的制约, 相机必须在摆动装置摆动到特定的角度时开始曝光, 以保证角度信息的精度. 因此, 相机选择外同步工作方式, 在同一个外部触发信号下同步工作, 实现同步采集 3 个波段的图像数据. 同步触发信号的产生与摆动装置摆过的角度相关.

2.5 数据采集与数据记录

多角度多光谱成像系统主要由两类相机构成, 一是可见/近红外 1024×1024 Si CCD 相机, 数据传输速率各为 10MHz, 另一类是热红外 320×320 相机, 数据率相对较低, 数据采集的焦点集中在可见/

近红外部分. 正是由于这两类相机在数据量和数据率上的不一致性和可见近红外相机与热红外相机在曝光时间上有差距, 加上可见近红外相机数据输出的瞬时速率非常高, 分别达到 20MBPS, 因此, 在数据采集记录方面采用两套装置. 对于可见/近红外图像数据的采集采用两块商业数据采集板通过一台计算机将数据记录到磁盘阵列上, 而热红外采用自制数据采集板, 记录于计算机硬盘. 这两套采集装置各自需要一套计算机进行控制.

由于计算机技术和电子技术的发展, 数据采集板卡也有了很大的发展, 一个明显的特点是日前几乎所有的数据采集卡上均消除了帧存, 而充分利用计算机的总线速度和内存等, 这样有利于降低成本和提高板卡数据采集和相机控制的性能. 另外一个明显的特点是, 目前许多数据采集卡上取消了数据处理处理器, 取而代之的是利用主机的 CPU, 当然, 一些实时处理要求高的数据采集卡仍然带有数据处理器. 在本系统中, 可见和近红外图像数据采集用美国 BitFlow 公司生产的 RoadRunner 数据采集卡.

在本系统中有两台 1024×1024 CCD 12bit 数字相机, 每台相机一帧图像的数据量为 2MB, 共计 4MB, 如每秒钟采一幅图像, 其数据率约为 4MBPS. 通常可以通过数字磁带机、磁盘阵列记录图像数据. 磁带机和磁盘阵列在应用时各有优缺点. 常用的数字磁带机有 Exabyte 磁带机, 技术上相对比较成熟, 其中的 Mammoth 2 型磁带机是目前数字磁带机中速度较快的一种, 突发记录速度达到 12MBPS. 但是这种磁带机对环境的要求较高, 如果环境温度过高, 会造成磁带机死机, 振动稍大时, 会造成磁带机轨迹跟踪失败, 重新寻迹, 瞬间图像数据丢失. 而磁盘阵列是由多个硬盘组成的高速大容量数据记录设备, 主要用于计算机服务器中的数据库系统. 数据的可靠性是数据库系统的致命要素, 数据库系统的硬

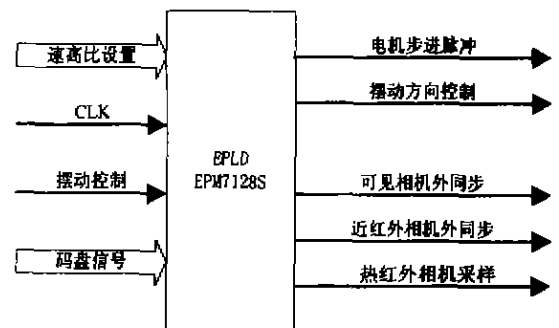


图 2 电机控制器示意图

Fig. 2 Block diagram of motor controller

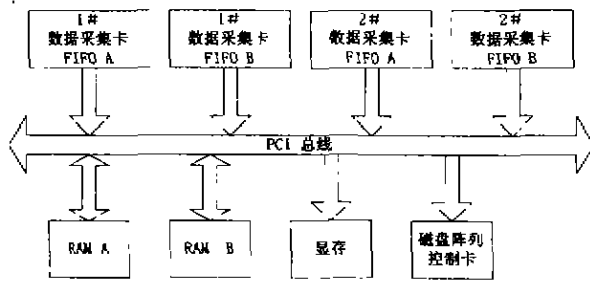


图3 数据流向示意图
Fig. 3 Data flow in PCI-bus

件建设主要是通过可靠性展开的. 磁盘阵列的可靠性是通过数据冗余和镜像存储实现的, 即当磁盘阵列接收到一组数据时不是直接记录到磁盘上, 而是首先产生一组校验数据或镜像数据和原始数据一道记录到磁盘上, 当某一磁盘发生故障时, 启动备份磁盘, 将受损磁盘中的数据重建到新磁盘中, 同时禁止故障磁盘, 保证数据不被丢失. 磁盘阵列可以根据不同的要求建立不同的工作方式, 达到不同的保护程度和工作速度. 磁盘阵列的工作速度是通过多个磁盘并行工作提高的, 在本系统中采用3个硬盘组成磁盘阵列, 其中2个盘构成一组RAIDO方式下的工作盘, 另一个作为热备份盘, 这样, 既可以提高记录速度, 也可以保证一定的可靠性.

在飞行作业时, 通过数据采集卡的双通道功能, 在将图像数据送往计算机内存的同时送给显存, 利用计算机的显示资源实现图像显示功能, 节约CPU时间, 提高了CPU对图像数据的处理速度. Road-Runner系列数据采集卡的显示功能依赖于计算机的VGA适配器而不是板上芯片. 显示的分辨率和

刷新速率受图像限制. 应用程序可以选择将图像数据送到Windows GUI或特定的DMA方式直接送到VGA存储器, 而不经计算机的CPU.

监控软件在本系统中起重要作用, 所有的数据都是在监控软件的控制下记录到记录设备中, 所有的单部件都是在监控软件下协调工作. 本系统中, 可见和近红外两台相机在一台计算机控制下工作, 数据传输成了关键问题, 如图3所示, 计算机的PCI总线要处理6个数据流. 每一数据采集卡有一路12位数据从FIFO送至计算机主存, 一路8位数据送至计算机显存; 另外, 每一相机的图像数据需要经过PCI总线送至磁盘阵列, 而且这些数据几乎是同时进行的. PCI总线的速度是有限的, 猝发速度最大为132MBPS, 而每一相机传送至数据采集卡的速度是20MBPS, 这一数据在PCI总线也将占用20MBPS的带宽, 这些图像数据送至磁盘阵列在PCI总线上占用的带宽也是20MBPS, 而每一显示图像数据在PCI总线上占用的带宽是10MBPS, 这样总的带宽需要90MBPS, 已经接近PCI总线的极限带宽.

3 地面性能检测

系统的光谱响应、空间分辨率、总视场噪声等效反射率、 $NE\Delta\rho$ 以及摆动装置的角度精度是系统的主要技术参数. 空间分辨率、总视场和摆动装置指向精度直接影响几何纠正的精度, $NE\Delta\rho$ 在任何遥感仪器中都是重要的技术参数, 在本系统中直接影响BRDF的反演精度.

3.1 可见近红外通道光谱响应

可见近红外均采用加拿大DALSA公司生产的 1024×1024 硅CCD面阵探测器相机, 波段的选择通过前置滤光片实现, 通道的响应与前置滤光片、光学镜头以及探测器件和电子学系统均有关. 测试时利用单色仪确定通道的总的相对光谱响应曲线, 如图4所示.

3.2 空间分辨率和总视场测试

利用平行光管、转台、分辨率靶测量了系统的空间分辨率和总视场, 测试装置如图5所示. 测试时, 在平行光管的人瞳处放置一刀口仪, CCD相机置于一转台上. 首先, CCD相机采集一图像, 确定光斑位置. 然后, 相机转过一个角度, 再采集一幅图像数据, 确定光斑位置, 通过计算两个光斑的位置变化和转台转过的角度, 即可确定系统的瞬时视场. 在测量总视场时, 只需要确定刀口仪的光斑在CCD相机从一

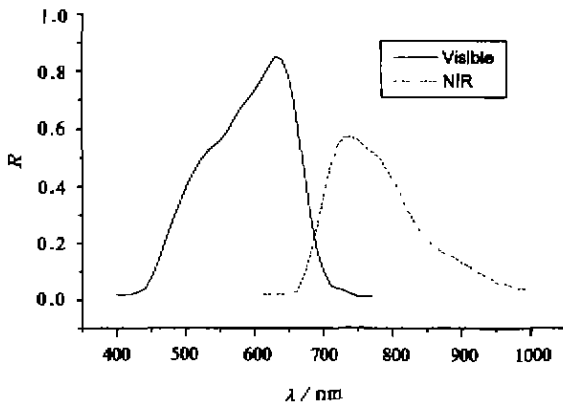


图4 AMTIS可见近红外通道相对光谱响应曲线
Fig. 4 Normalized spectral responsivity of VNIR channel of AMTIS

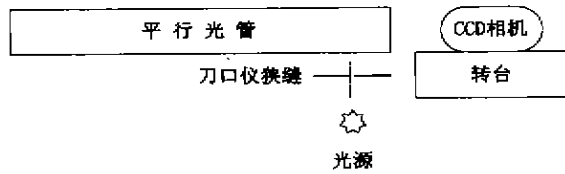


图 5 空间分辨率和总视场测试装置示意图

Fig. 5 Instruments for measuring IFOV and TFOV

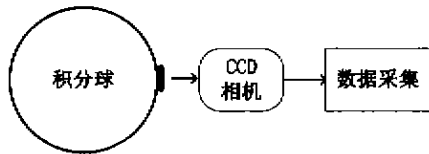


图 6 NEΔρ 测试装置示意图

Fig. 6 Instruments for measuring NEΔρ

端移动到另一端时,转台所转过的角度。

2.3 NEΔρ 测试

在测量系统的等效比辐射率时,利用积分球产生具有一定辐照强度的均匀视场,通过检测信号的平均强度和统计信号的均方根误差来计算系统的 NEΔρ,图 6 给出了试验装置示意图。

对于系统测量所得到的噪声主要由 CCD 相机本身的噪声和积分球的噪声组成。积分球的发出的光线强度随时间波动,CCD 器件的响应率也是时间的函数,实际测量得到的噪声是积分球和 CCD 器件噪声的叠加。改善相机供电可以减小噪声水平,提高系统的信噪比。

3.4 摆动角度

本系统摆动装置的指向精度要求是 0.5°。测量摆动角度时,在摆动装置转轴的另一端,配有延伸轴。地面测试时,在延伸轴安装上一光电码盘,通过光电码盘产生的计数脉冲获取摆动的角度。光电码盘的精度为 0.1°,可以满足测量精度的要求,通过检测,证明角度摆精度优于 0.2°,达到设计要求。

4 航空飞行试验

根据课题需要,在 863 专家组的支持下,于 2000 年 10 月 10 日至 10 月 26 日在哈尔滨组织了多角度多光谱成像系统 AMTIS 样机的性能试验飞

表 2 设计指标和测试结果

Table 2 Design values and testing results

	IFOV	TFOV	NEΔρ	指向精度
设计值	0.5mrad	28.7°	0.5%	0.5°
测试结果	0.503mrad	28.9°	1.61%	0.17°



图 8 哈尔滨平房机场热处图象

Fig. 8 Thermal image of Pingfang Airport, Harbin

行。飞行试验检测了多角度成像仪飞机上的适应性,包括机上安装、抗震动、抗电磁场干扰、稳定性、气压和气流(飞机腹部舱门开口处)的影响等适用性飞行试验及观察。地面分辨率飞行实验,对成像仪的可见光、近红外、热红外的空间分辨率(瞬时视场)在飞行高度 4000m 时利用一平坦的地面设置布标(或靶标)进行测试。角度效应的飞行实验,采用地面布设靶标与典型地物相结合的办法。扫描总视场的测量,采用几何纠正前与纠正后的图像所对应的地表典型地物来测量。在飞行实验区选址时考虑了典型地物的尺度问题,飞行时的飞行高度为 4000m,飞行速度(地速)为 220km/h,整个飞行共获取图像数据约 10GB。试飞结果证明,仪器的抗震性、飞机供电的适应性、稳定性以及的地面分辨率、总视场角等指标均达到设计要求。

图 7(见彩色插页 4)给出了黑龙江省队阿城地区经过几何校正、航带拼接和图像配准后的 9 个角度的可见近红外双通道伪彩色合成图像。

图 8 给出了哈尔滨平房机场热红外图像。

5 结论

通过本课题的研究,验证了系统的总体设计方案是合理可行的,并以此构建一套机械多角度多光谱成像仪的原理样机,这将促进我们开展地物二向反射特性和大气传输特性等方面更深入的研究,提高遥感研究的定量化精度,在精细农业、森林、城市规划等方面具有广泛的应用前景。

REFERENCES

- [1] William C Snyder, Zhengming Wan. BRDF models to predict spectral reflectance and emissivity in the thermal infrared. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, **136**:214—225
- [2] X Li, Strahler A H. Geometric-optical bi-directional reflectance modeling of discrete crown vegetation; Effect of crown shape and mutual shadowing, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **130**:276—291
- [3] Diner D J, Bruegge C T, Martonchik J V, *et al.* A multi-angle imaging spectro radiometer for terrestrial remote sensing from the earth observing system. *J. Imaging Syst. Technol.*, 1991, **3**(2):92—107
- [4] Irons J, R Ranson J T, Williams D L, *et al.* An offnadir pointing imaging spectrometer for terrestrial ecosystem study. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1991, **29**:66—74
- [5] Deschamps P M, Breon F M, Leroy M, *et al.* The POLDER mission; instrument characteristics and science objectives. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1994, **32**(3):598—615
- [6] Jun-Fa Wang. An Airborne multi-angle TIR/VNIR imaging system. *Remote Sensing Reviews*, 2000, **19**:161—169
- [7] LI Xiao-Wen. *Observe the Earth in Multi-angle and its Application*. Beijing: China Timbering Industrial Publishing House (李小文. 多角度对地观测技术与应用研究. 北京:中国建材工业出版社)1999
- [8] WANG Jin-Di, LI Xiao-Wen. *Experiment Research on the Ground Target in Multi-angle*. Beijing: China Scientific and Technological Publishing House (王锦地、李小文. 地面目标的多角度观测实验研究. 北京:中国科学技术出版社).1996
- [9] CHENG Shu-Peng, TONG Qing-Xi, GUO Hua-Dong. *Mechanism of Remote Sensing Information*. Beijing: Science Press (陈述彭, 重庆禧, 郭华东. 遥感信息机理研究. 北京:科学出版社).1998