

PHI 超光谱成像系统及其海洋遥感应用前景分析*

李红波 舒 嵘 薛永祺

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要 超光谱成像仪研究是成像光谱技术领域中的一个新的课题. 该成像仪利用高分辨率的焦平面探测器在保持其空间分辨率和信噪比的基础上, 可得到多达几百个波段的光谱图像数据. 本文阐述了它在海洋遥感应用中的发展前景, 并分析了 PHI (Pushbroom Hyperspectral Imager) 仪器及其海洋遥感应用.

关键词 超光谱, 超光谱成像仪, 海洋遥感.

PUSHBROOM HYPERSPECTRAL IMAGER AND ITS POTENTIAL APPLICATION TO OCEANOGRAPHIC REMOTE SENSING*

LI Hong-Bo SHU Rong XUE Yong-Qi

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

Abstract Pushbroom Hyperspectral Imager (PHI) is a new and special topic of spectral imaging technique field. It uses high resolution CCD FPA to get hundreds of image data of spectral bands, while keeping a high spatial resolution and high SNR. The PHI, its oceanic remote sensing applications and its prospects are analysed.

Key Words hyperspectra, hyperspectral imager, oceanic remote sensing.

引言

随着各种光谱区域焦平面探测器制造技术的发展, 尤其是可见光、近红外光谱范围的硅 CCD 的商品化, 推动了凝视型推帚成像光电传感器的发展. 仪器利用探测器的固体自扫描特性, 使得系统以其高光谱分辨力、高灵敏度和无机械运动部件等特点而成为新一代的推帚成像系统. 目前, 推帚式成像光谱技术不论在星载平台或者机载平台都是首先考虑的技术方案, 可以认为高光谱遥感一方面正在由实验研究阶段逐步转向实际应用阶段, 而在技术发展方面则由以航空系统为主开始转向于航空和航天高光谱分辨率遥感系统相结合的阶段, 我国早在二十世纪九十年代中期在超光谱成像仪的研制方面已经取得了令人瞩目的成就, PHI-I (Pushbroom Hyperspectral Imager)、PHI-II 相继研制成功, 它们工作在可见、近红外波段, 在植被生长状态、湿地生态环境调查, 地物精细光谱分析, 环境监测和城市规划等方面

已经发挥了和正在发挥着重要的作用.

在海洋水质监测应用方面, 用光谱能够观测水下状况的只有可见光, 其中穿透性最强的波长范围为 $0.45 \sim 0.6 \mu\text{m}$ (蓝光至黄光), 被称为“海洋窗口”, 利用成像光谱技术可以观测到海洋中沉积性悬浮物、浮游生物、叶绿素的分布等海况, 例如用于估值海洋沉淀物和叶绿素含量, 而叶绿素含量的估值可以用于监视海藻的生长和推断水产研究中浮游生物的分布和鱼群位置. 对我国而言, 随着沿海地区的工业化、城市化的发展, 海洋环境污染日趋严重海洋污染给国家造成了巨大的经济损失. 利用 PHI 成像光谱遥感技术不但能够快速确定海洋污染源的位置和运动的大空间尺寸及高的覆盖频率, 而且还能够通过分析获得的光谱图像直接识别海洋污染物的类型, 从而为海洋环境的治理提供快速有效的科学依据.

1 PHI 成像仪系统

PHI 系统设计独特, 完全实现了温度控制、积分

* 国家 863 高科技 (308-10-01, 863-818-09-10) 资助项目
稿件收到日期 2001-09-17, 修改稿收到日期 2002-05-23

* The project supported by the National High Technology Program (No. 863-308-10-01, No. 863-818-09-10)
Received 2001-09-17, revised 2002-05-23

时间和扫描率可调. 它采用低读出噪声 ($25 \sim 35e^{-}$ RMS)、高速帧转移面阵 CCD, 该器件可覆盖整个可见光光谱范围 (400 ~ 870nm). 其有效像元数为 652×488 , 652 用于空间采样, 光敏元尺寸为 $12\mu m \times 12\mu m$. 系统设计特色有: (1) 采用了高速、大容量数据缓存和记录系统, 输入数据率可达 8 MByte/s, 可同时存储 120 个以上波段的数据; (2) CCD 采用了半导体制冷技术, 大大提高了系统的信噪比; (3) 利用了良好的人机界面图形用户接口 GUI (Graphical User Interface) 的优点, 采用 32 位 C++ 编程语言, 使仪器更加通用化, 操作也更为方便、简捷. 另外, PHI 成像仪经过了严格而标准的光谱定标和辐射定标, 为后续的遥感定量化研究提供了准确而又科学的依据.

1.1 成像方式:

PHI 系统是典型的推帚式成像. 其光学系统如图 1 所示. PHI 系统采用了棱镜和光栅组做色散元件. 系统的主要技术指标见表 1 所列.

1.2 仪器组成

PHI 成像仪系统分为光学头部、信号处理器、工业控制计算机、电源几部分. 其中, 头部完成成像、色散、光电转换和模数转换功能, 信号处理器接收头部传出的数据对其进行处理, 计算机则实现记录数据和实时监控的功能. 另外成像仪还配有 GPS 接收系统和三轴稳定平台的接口, 可以获得良好几何保真度的高光谱图像.

1.3 高速数据采集与记录系统

高光谱数据随着应用领域的不断扩展, 光谱波段在红外、紫外等光谱区内不断的增多, 再加上高的量化位数和高的空间分辨率, 数据的传输和记录变得越来越困难. 目前 PHI 系统采用 PCI (Peripheral Component Interconnect) 总线的数据采集系统及 IDE 磁盘阵列记录系统. 采集的大容量数据通过专用的

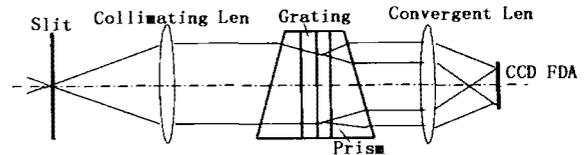


图 1 光学成像系统
Fig. 1 The optical system of PHI

IDE 磁盘阵列适配卡, 将数据记录在 2 个 IDE 硬盘组成的硬盘阵列上, 其记录速度可达 8MB/s 以上. 另外在选择硬盘中考虑到大多数硬盘采用区域恒角速度 (ZCAV) 的技术来制造, 该技术的利用虽然大大提高了硬盘的容量, 但硬盘的数据传输率却随盘地址的不同而不同. 特别在以磁盘阵列机为存储介质的高速数据实时记录系统中, 这种影响极为明显. 实验表明 PHI 系统如果硬盘上事先存储大约 1GB 左右的数据, 硬盘在记录时速度就会比较稳定并达到最佳状态.

另外缓存容量的大小对数据传输率也有很大的影响. 缓存容量小, 单位时间内的 I/O 请示次数将增加系统的辅助开销. 缓存容量太大, 若缓冲一次的数据量大于磁盘一次读写操作的最大量, 则要发生失连操作, 一旦发生失连, 系统的辅助开销就会增加. PHI 系统缓存容量采用下式来计算

$$R = 1.99 + 1.25 \times B - 0.1 \times B^2, \quad (1)$$

其中 R 为数据传输率 (MBps), B 为缓存量 (KB).

为了更好地满足速度要求, 在软件编写中利用了 Microsoft 开发的 DirectX 技术, 利用 DirectDraw 来直接访问显示存储器和视频存储器, 而无需占用 CPU 的处理时间, 这就使得这种操作并不占用硬件 I/O 和写盘的时间, 有效地减少了系统的辅助开销, 提高了数据采集的速度.

1.4 信噪比分析

仪器信噪比测定: 遥感仪器的信噪比是仪器的一个非常重要的性能指标. 在实验室内一般采用白板测试的方法. 即用一个均匀性和稳定性都很好的辐射源 (标准灯或积分球的辐射输出) 照射到一个比较理想的朗伯体白板反射面上. 白板的反射输出直接对准仪器的人射口, 记录下仪器输出的数值量. 保持入射辐射恒定的条件下, 持续测量足够的次数. 最后将所有记录下来的数据求平均值和均方差. 两

表 1 PHI 系统的主要技术参数

Table1 Main technical parameters of the PHI system

光谱范围	400 ~ 870nm	空间采样	652 像元/行
波段数	124	空间采样密度	0.6mrad
光谱分辨率	小于 5nm	量化位数	14
视场	23°	空间分辨率	1.3mrad

表 2 测定的 PHI 信噪比

Table 2 The measured SNR of the PHI system

λ (nm)	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850
SNR	70	359.2	530	557.2	581.4	586	475.6	336.4	322	250

者的比值即为仪器的信噪比值。

遥感图像数据信噪比计算:是遥感仪器所获取的数据的质量的一个重要评价标准.它主要决定于仪器的性能,同时还和数据获取时的环境条件,以及地物变化的空间频率等因素有一定的关系.成像光谱仪是一个复杂的光电系统,在信号中引入噪声的因素很多.采用去相关的方法,将原始数据中具有高相关性的信号去掉,求出其噪声.结果表明图像数据的信噪比能充分反映遥感仪器的信噪比性能。

1.5 低照度下噪声信号分析与非均匀性校正

在低照度下获得的图像噪声主要有以下 2 种:

暗电流噪声:复合——产生中心非均分布,特别是某些单元位置上缺陷密集形成暗电流峰,图像上表现为背景的大起伏.一般在长时间的工作中,暗电流的影响是主要因素. PHI 系统中采用了 CCD 器件致冷技术,实际飞行中可以把温度设置在恒温状态,实验证明当工作温度每降低 8°C , CCD 的暗电流就能减少一半.而且在对获得的数据进行初步处理时,也可以先减去事先测量获得的暗电流图像,来消除暗电流噪声。

光响应非均匀性:主要与器件的制造工艺有关,表现为 CCD 的各个像元在均匀光源照射下 CCD 器件具有光响应非均匀性.实际飞行时物镜 F 数为 5.6,积分时间可调,温度恒定为 16°C ,光谱图像的非均匀性如下:

- 所有的条纹表现为沿飞行方向的竖条纹;
- 信号在图像边缘表现出比较明显的光学非均匀性;
- 在弱信号时表现为左右两路电输出的增益不平衡比较明显;
- 不同积分时间下陆地滩涂有一些间断性的黑白条纹;
- 海面目标的间断性的条纹由于耀斑效应表现



图 2 校正前

Fig. 2 Before correction airborne PHI image in Bohai Bay, China, 2001. 7.

不明显,但它也存在。

下图是 2001 年 7 月获取的经纬度为 $\text{N}38^{\circ}05'$, $\text{E}118^{\circ}41'$ 且飞行高度为 562m 海洋赤潮第 61 波段 (621.7nm) 图像. 图 2 中海面的水体信息几乎被条纹和增益的差异而淹没,而在图 3 中得到了完全的恢复,海面的波浪、赤潮等清晰可见. 所有的波段经过校正后再经过反射率转换,效果显著,而且从校正后的直方图分析,图像的光谱信息并没有丢失。

2 PHI 成像仪系统海洋遥感应用

2.1 海洋遥感应用

由于大气的瑞利散射和气溶胶散射,海面反射率低,来自海水的有用信号只占全部信号的很小一部分.这种在强干扰背景下探测微弱有用信息的情况决定了所选择的遥感仪器必须具有很高的辐射灵敏度和多个波段.波段窄,可以很容易地探测到地物反射光谱中的吸收峰,它决定了辐射光谱中测量特征的精度;波段多,可以消除大气的干扰,分离出有关波段的近表层水中的后向散射辐射.一般水色观察要求为:光谱分辨率 $< 5\text{nm}$; 噪声等效光谱辐射亮度 $< 0.03\text{Wm}^{-2}\text{Sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$; 动态范围 > 1000 , 这些条件是根据基于辐射传输理论的大气辐射传输校正 LOWTRAN-5^[1] 的条件推算出来的. 总之,高的光谱分辨率、多波段和高的探测灵敏度是海洋遥感仪器必备的元素。

PHI 成像仪系统于 2001 年 6 月 26 日首次在天津渤海湾附近运用海监飞机获取了各种海洋目标的高光谱数据. 图 4 是 2001 年 7 月 1 日获取的经纬度为 $\text{N}38^{\circ}06'$, $\text{E}118^{\circ}58'$ 且飞行高度为 484.51m 的海洋溢油图像. 图像数据经过初步分析表明,无论是从空间分辨率还是光谱分辨率,油污能明显地被辨别出来,可以根据油污的厚薄不同在图像上表现的灰度不同来估算油污覆盖的面积和数量,以此来获得



图 3 校正后

Fig. 3 After correction airborne PHI image in Bohai Bay, China, 2001. 7.



图4 海洋油污的高光谱图像
Fig.4 The hyperspectral image of oceanic oil contamination

海水中溢的严重程度,图5中可以清楚地看出,有油污的地方,可见和近红外波段的信号强度比海水的信号强度明显要高(如图5中数据的位置位于图4黑色箭头处).

从图6(三波段:R785.6 nm;G593.9 nm;B506 nm)密度分割图可以清楚地分辨出油污及其和海水的交融程度,中间褐色的地方是油污和海水交融后产生的小的波浪,可以根据密度分割结果对油污含油量进行半定量计算.图7是为研究海洋赤潮由国家海洋局北海分局在大连鲅鱼圈设立的围隔,它用来专门培养某些赤潮生物的优势种类.图8是获得的围隔袋内主要的赤潮生物为角毛藻、海链藻、骨条藻等3种主要硅藻的生物,经过精心的培养,使围隔带内呈现出了赤潮生物暴发前期和形成赤潮迹象,然后利用获得的地面光谱和高光谱遥感数据来探索赤潮发现及自动化检测、赤潮生物优势种类识别和赤潮生物量分布特征提取技术.目前国内则是对其中的一些优势藻类进行了局部的光谱特性研究.渤海叉角藻赤潮水体的反射光谱曲线呈现两峰两谷,

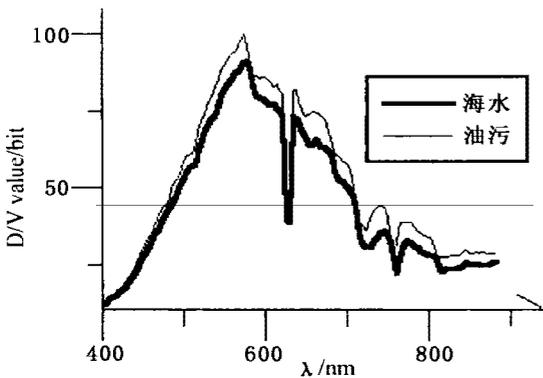


图5 图4油污及海水信号强度曲线
Fig.5 The reflectivity curves of oil and sea water in Fig.4



图6 海洋油污密度分割显示
Fig.6 Density slice of oceanic oil

两个反射峰分别位于570 nm和684~695 nm处,两个波谷分别处在425~525 nm和662 nm^[3](Zhao, 1998).浙江舟山栲海区域裸甲藻水体的特征光谱为690~710 nm(Huang, 1996).目前正在利用地物光谱数据和成像光谱数据对围隔袋的数据进行分析.

2.2 海洋遥感误差分析

(1) 系统误差

仪器的光谱响应与传感器光谱响应的一致性程度会带来光谱带中大气吸收带计算的误差;传感器的信号随太阳在不同高度角时照度的变化而变化,因此一个目标在一个景的不同区域会有不同的辐亮度,因为它从不同角度看到的,或者在不同的景中会由于太阳高度角变化而不同的表现,而这样则会体现为反射率的不同;

(2) 测区环境带来的误差

试验区的背景目标,大气散射等环境因素会有很大的影响;

(3) 海洋目标带来的误差

围隔袋中的有效目标小,高光谱数据表现为混合像元,而且海水具有流动性,波峰或波谷都会产生反射耀斑.地物光谱仪比成像光谱仪有更高的光谱

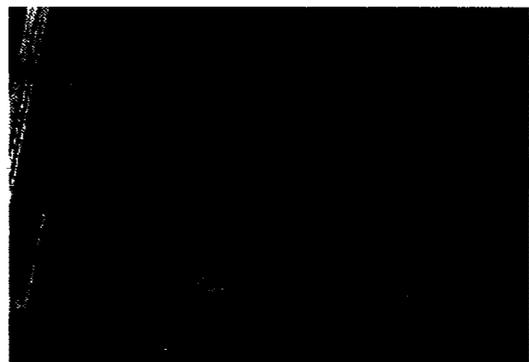


图7 数码照片
Fig.7 Digital photo

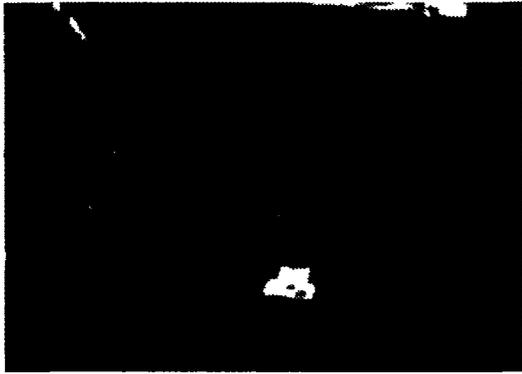


图 8 三波段合成图像
Fig. 8 RGB composite image

分辨率,而且其视场角比较小,因而受背景影响的因素比较小,用它来对成像光谱数据进行校正分析.混合像元是由于大气的散射效应的存在使邻近像元的反射进入目标像元的光路被传感器接受引起的,其效果是图像边模糊,目标像元的光谱响应混合了邻

近像元的光谱行为.交叉辐射影响具有局部性,它可以通过求大气的点扩散函数(PSF)来消除.

3 结语

PHI 经近两个月的飞行、转场考验证明高光谱成像仪工作稳定,图像清晰,有足够的信噪比和光谱分辨力可以满足海洋遥感应用需要.而数据分析,信息特征提取和模型建立则是其获得实际应用必不可少的工作.

REFERENCES

- [1] Kneizys F X, Shettle E P, Gallery W O. Atmospheric transmittance and radiance: the Lowtran 5 code. *SPIE*, 1981, 277
- [2] CAO Wen-Xi, ZHONG Qi-Ying. Principal component analysis for ocean color remote sensing in south china sea. *Journal of Remote Sensing* (费文熙, 钟其英. 南海水色遥感的主因的分析. *遥感学报*), 1999, 3(2): 112 — 115