

实用型模块化成像光谱仪*

刘银年 薛永祺 王建宇 沈鸣明

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要 介绍研制的一种先进的光机扫描光谱成像仪, 即实用型模块化成像光谱仪(OMIS)。它具有 128 个波段, 覆盖了从可见光到热红外的光谱范围, 可应用于地质、农业、林业和海洋等领域。全面介绍了 OMIS 的系统设计及其整体性能, 简要给出了该 OMIS 进行的多次遥感飞行作业情况。

关键词 OMIS, 成像光谱仪, 航空遥感。

OPERATIONAL MODULAR IMAGING SPECTROMETER*

LIU Yin-Nian XUE Yong-Qi WANG Jian-Yu SHEN Ming-Ming

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

Abstract Operational modular imaging spectrometer (OMIS), an advanced optical mechanical scanning imaging spectrometer was developed. It has 128 spectral bands ranging from visible to thermal infrared wavelength. Its application fields include geology, agriculture, forest, ocean, etc. The system designs, running configurations and functions of OMIS were introduced. Multiple examples of remote sensing applications of OMIS since 2000 were briefly given.

Key words OMIS, imaging spectrometer, airborne remote sensing.

引言

20 多年来,人们通过各种遥感手段观察地球,其中,成像光谱技术在人类对地观测领域显示出了突出的优势。成像光谱仪将传统的二维成像遥感技术与光谱仪技术有机地结合在一起,在获取观测对象二维空间信息的同时,在连续光谱波段上对同一地物分光谱成像。由于光谱图像数据中每一像元含有与被观测物体组分有关的光谱信息,能直接反映出物体的光谱特征,从而可以揭示各种地物的光谱特性、存在状况以及物质成分,使得从空间直接识别地球表面物质成为可能。自 1970 年以来,我们研制了多种类型的通用及专用航空扫描仪^[1],其光谱范围覆盖从紫外到热红外的各个大气窗口,波段数从单一波段发展到了 60 多个波段。但随着成像光谱遥感应应用技术的研究和发展,对于仪器光谱分辨率的要求越来越高,从多光谱向高光谱发展成为成像光谱仪的一大趋势。另外,越来越多的遥感应应用对于遥感仪器的实用化和可操作性也提出了更高的要求。为此,在以往工作的基

础上^[2],我们在近几年中开展了实用型模块化成像光谱仪的研制工作。本文全面介绍了 OMIS 的系统设计及其整体性能,简要给出了 OMIS 研制以来所进行的多次遥感飞行作业情况。

1 系统设计

1.1 光谱波段选择

大量的统计数据表明,各类地物的特征光谱分布如图 1 所示。从图 1 地物特征光谱段的综合分布情况中可以看出:(1) 特征光谱段在 $0.4\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ 光谱区,除大气吸收带外,近乎连续分布;(2) 在 $0.4 \sim 12\mu\text{m}$ 光谱区,根据中介体类型,各类特征光谱段分布的密集程度及其对应的应用领域,可划分出 3 个自然区段,即 $0.4 \sim 1\mu\text{m}$, $1.3 \sim 2.5\mu\text{m}$ 及 $3 \sim 12\mu\text{m}$ 区段;(3) 现有的研究成果表明:在 $0.4 \sim 1\mu\text{m}$ 及 $1.3 \sim 2.5\mu\text{m}$ 区段,具有判别价值的特征光谱吸收峰带宽多在 20nm 以下。

因此,实用型模块化成像光谱仪在光谱区间选择、模块划分及光谱分辨率确定等方面的技术指标

* 国家 863 计划(批准号 863-308-10-01(1))资助项目
稿件收到日期 2001-10-15,修改稿收到日期 2001-10-29

* The project supported by the High Technology Plan (863 Plan) of China(No. 863-308-10-01(1))
Received 2001-10-15, revised 2001-10-29

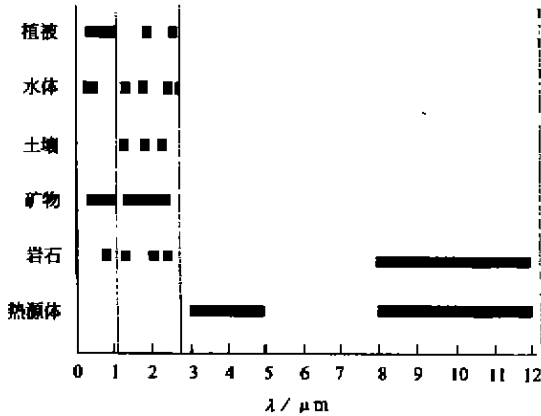


图1 典型地物特征光谱段分布图

Fig. 1 The distribution of typical ground object spectrum

应该符合上述3个特征。OMIS成像光谱仪设计了2种工作模式：OMISI型自可见光至热红外区域划分为5个光谱段，总共128个波段：0.46~1.1μm 64个波段，光谱分辨率10nm；1.06~1.70μm 16个波段，光谱分辨率60nm；2.0~2.5μm 32个波段，光谱分辨率15nm；3~5μm 8个波段，光谱分辨率250nm；8~12.5μm 8个波段，光谱分辨率500nm。OMISII型共有68个波段，0.46~1.1μm 64个波段，光谱分辨率10nm；1.55~1.75μm, 2.08~2.35μm, 3~5μm, 8~12.5μm各1个波段。

1.2 光电探测器

系统选用的焦平面探测器，在可见与近红外波段为硅线列器件，元数为64元，短波红外I为铟镓砷线列器件，元数为16，短波红外II和中红外波段为碲化铟线列器件，元数分别为16和32，热红外波段选用碲镉汞线列器件，元数为8。

1.3 成像光学系统

实用型模块化成像光谱仪系统采用线列探测器-光机扫描型方案。在系统的总体设计中，光谱分辨率、空间分辨率、灵敏度和体积重量之间是相互制约的。由于成像光谱遥感技术是被动遥感技术，地面辐射和反射的能量是相对恒定的，光谱通道的增多和光谱分辨率的提高使每个波段的探测能量变弱，因此加大光学系统的通光口径是必然的。从性能指标和实现可能考虑，确定了200mm的大通光口径。光机扫描系统采用斜45度镜结构，具有通光面积大，转动稳定可靠的特点。为减小整机的体积重量，对系统的光学结构布局作了精心设计。

成像光谱仪的探测光谱范围在0.4~12.5μm，总共128个波段，按大气窗口和光电探测器类型分

为5个光谱段：即0.46~1.1μm、1.06~1.70μm、2.0~2.5μm、3.0~5.0μm、8.0~12.5μm。由于分色器光谱性能的限制，必须将成像系统的入射光路分为两部分。成像光学系统的主光路采用牛顿式系统，使光机结构简单且稳定性较好。在主光路系统的次镜前面放置一块45°平面反射镜，次镜所遮挡的光由45°平面反射镜从主光路系统反射出，作为辅光路，在I型配置中构成短波红外1.06~1.70μm独立的望远镜-分光计分系统。这一巧妙的设计不但解决了光谱段1与光谱段2的分光难题，而且采用具有较高光学效率的反射系统，避免了选择光学材料的困难。其它光谱段以级联方式用分光镜逐级分离光谱，共用牛顿式望远镜的视场光阑，都采用平面光栅色散、透镜组会聚的方式。两路视场光阑的空间配准在光校时予以保证。I型配置相应的5个分光计，分上下两层布局。红外探测器杜瓦瓶集中在上层，便于工作时灌注液氮。整体结构紧凑，布局合理。

在II型配置中，所有光学元件都在一个平面上展开，固定在同一基板上。0.46~1.1μm、3~5μm、8~12.5μm光谱段通过主光阑与成像系统耦合。可见/近红外分光计采用平面光栅色散、透镜组会聚的方式。在Si线列探测器前，加入一个特殊设计制作的滤光片，以截止二级光谱的干扰。中红外和热红外波段使用InSb/HgCdTe双色探测器，由一块抛物面反射镜即可完成这两个波段的会聚。短波红外的两个单元探测器通道放置在辅光路中，设计在分光镜位置上，直接放置2.08~2.35μm的一块带通分色滤光片，要求它的通带内有高的透过率，通带外有高的反射率。在它的反射光路中1.55~1.75μm的带通滤光片及探测器安置于此。这一设计具有简洁高效的特点，此时，探测器光敏面即为视场光阑。

1.4 光机头部结构

仪器的光机扫描头部由成像光学系统、承重平板和光谱仪组件三大部分组成。两种光谱仪配置，即128波段OMIS I型光谱仪和68波段OMISII型光谱仪与各自的承重平板结合为两大模块。成像光学系统和光谱仪的级联，光学上以视场光阑为界面，机械上采用平面定位连接结构，通过更换不同承重平槛实现光谱仪的不同配置，从而达到模块化组合的功能。承重平板即光谱仪的基板，承重平板的下方吊装成像光学系统，上方安装各分光计及探测器前放。光阑及光阑固定盘均安装在承重平板上。不同的空间分辨率通过可置换光阑实现。仪器在装机使用时通过承重平板与陀螺稳定平台连接。成像光学系统

与扫描镜、驱动电机、编码器组件集成成一个独立模块, I 型光谱仪和 II 型光谱仪的成像光学系统是公用的。

1.5 成像光谱仪运行系统配置

1.5.1 系统特色及组成

成像光谱仪系统总体配置的设计思想突出了系统的实用性,从机上遥感数据采集到地面用户需要的格式化图像数据产品,形成了一个完整的工作流程。系统具有以下特色:(1)波段覆盖全,系统从 0.4 μm 到 12.5 μm 的所有大气窗口上设置探测波段,以适合不同要求的综合遥感应用要求;(2)工作效率高,采用 70° 以上的扫描视场,提高实用化作业效率;(3)采样波段多,工作波段为 128,具有和目前国际上最先进的实用化机载成像光谱仪相当的光谱采样波段数;(4)模块化结构,扫描系统、成像系统和各光谱仪系统设计为独立模块,通过一定的机械结构相连,以便得到不同要求的光谱波段、光谱分辨率组合和不同空间分辨率的组合;(5)扩展能力强,在设计中充分考虑今后的技术发展和多传感器复合使用

的可能性;(6)实用化要求,系统充分考虑可操作性,相关的技术人员只要经过一定训练就可以具备操作本系统的能力;(7)定量化数据,通过同步研制的实验室辐射和光谱定标装置、机上实时定标装置,使系统具备提供定量化成像光谱数据的能力。成像光谱仪运行系统包括机载和地面两大部分,系统组成如图 2 所示。

1.5.2 机上系统

成像光谱仪的机上系统由光机头部、机上实时定标系统、机上电子学系统、实时数据记录和监视系统、陀螺稳定平台、GPS 定位系统等组成。机上电子学系统包括综合数据采集系统(采集图像数据和有关的辅助数据,如 GPS 数据、姿态数据、黑体温控数据等);电机驱动和机上供电系统;机上实时定标系统(主要是为仪器提供定量化数据的参考标准)。可见至短波红外波段采用标准灯作为参考源,热红外采用高低温黑体。实时数据记录系统基于 16 位 ISA 总线和大容量可移动硬盘的高性能工业控制机设计,每个硬盘记录容量可达 40GB,最小记录时间 240min(20 scan/s,

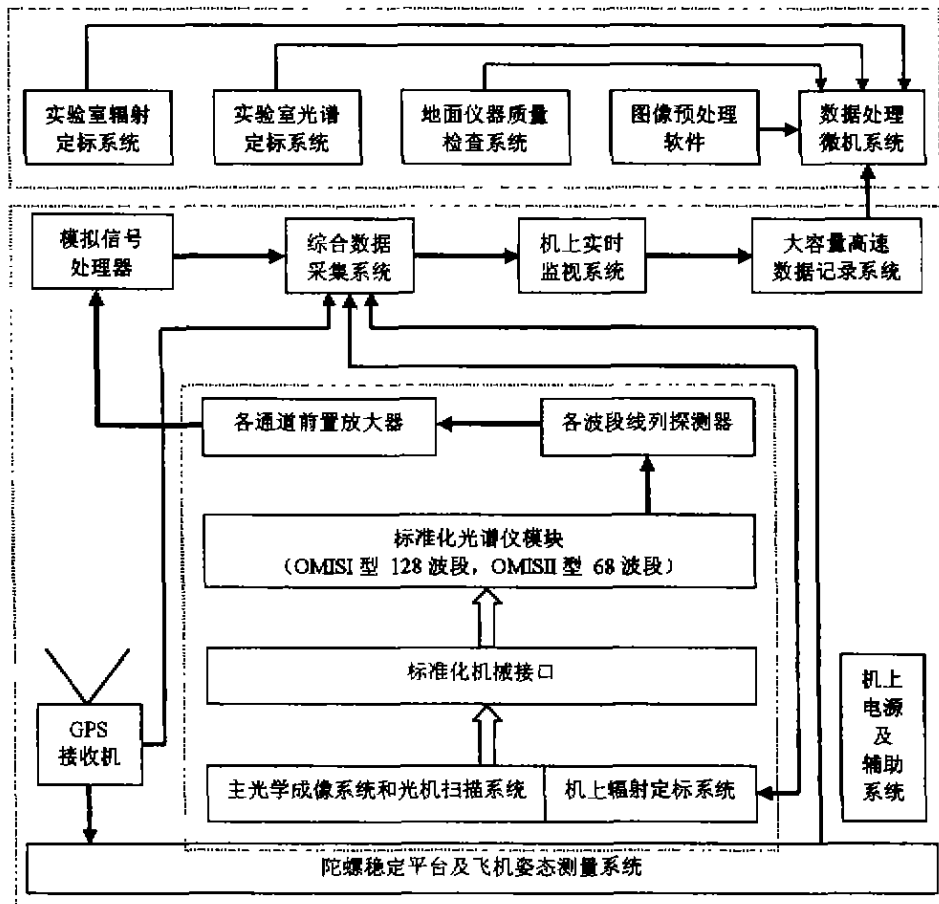


图 2 OMIS 系统结构图

Fig. 2 The system structure of OMIS

128全波段)。监视系统由9" TFT 640×480 LCD构成,提供536×400的实时连续滚动的可视图像,以便操作人员对飞行状况作充分的了解。机上定位采用GPS系统,定位系统的动态精度可达到m级。为确保成像光谱仪的图像获取质量,机上引入陀螺稳定平台,以确保仪器的姿态稳定。陀螺稳定平台的负重为150kg,稳定精度小于1个像元。

1.5.3 地面数据回放及格式化系统

地面数据回放及格式化系统主要实现如下功能:GPS数据的处理与复合、定标处理、坏行修补、像元配准、直方图计算、对比度拉伸、区域放大、光谱曲线显示、图像截取、图像数据格式转换等图像数据的预处理,并实现图像数据的连续滚动回放。

机上实时记录采用BIP格式高密度记录形式,事后由高性能微机和专用软件将其转换为BSQ格式,提供给用户。另外提供给用户的数据还有同步记录的辅助数据,辅助数据包含有GPS定位数据、平台姿态数据、高低温黑体温控数据,以及扫描率、增益、偏置等仪器参数数据。

1.5.4 实验室定标及辅助设施

实验室定标系统主要是为成像光谱仪进行光谱定标和辐射定标。由单色仪和准直系统组成光谱定标系统,用积分球作为辐射定标的标准源。根据实用化要求,光谱定标的准确度、辐射定标的灵敏度和信噪比如表1所示。同时,为确保成像光谱仪的实用化运行,配置相应的检测装置,特别是光学检测装置,能使仪器每经过一段时间的运行后,进行一次全面的检测,以确保仪器的运行精度。

2 主要技术指标及系统探测灵敏度

2.1 主要技术指标

系统主要技术指标如表2所示。

2.2 系统探测灵敏度

探测灵敏度是衡量仪器性能的一个很重要指标。

表1 各波段定标要求

Table 1 The requirement of calibration for each band

波 长	光谱定标 准确度	辐射定标 灵敏度	辐射定标 信噪比
可见/近红外	±2nm	0.02mW/cm ² srμm	300
短波1	±5nm	0.01mW/cm ² srμm	80
短波2	±2nm	0.01mW/cm ² srμm	80
红外3~5μm	±50nm	0.1K	80
红外8~12μm	±50nm	0.1K	80

表2 系统主要技术指标

Table 2 The main specifications of the system

OMISI型(128波段)		OMISII型(68波段)	
光谱范围	取样间隔 /波段数	光谱范围	取样间隔 /波段数
0.46~1.1μm	10nm/64	0.46~1.1μm	10nm/64
1.06~1.7μm	40nm/16	1.55~1.75μm	200nm/1
2.0~2.5μm	15nm/32	2.08~2.35μm	270nm/1
3~5μm	250nm/8	3~5μm	2000nm/1
8~12.5μm	500nm/8	8~12.5μm	4500nm/1
瞬时视场	3 mrad	3/1.5 mrad	
行像元数	512	512/1024	
总视场	>70°		
扫描速率	5, 10, 15, 20 scans/s		
数据编码	12bit		
记录及显示	硬盘,实时移动窗显示		
探测器	硅,碲镉汞,碲化铋,碲镉汞阵列		
陀螺稳定平台	150 kg载重量、稳定精度优于±4'		

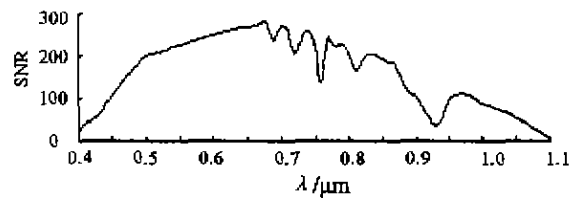


图3 可见/近红外波段信噪比曲线

Fig.3 The SNR curve of VNIR band

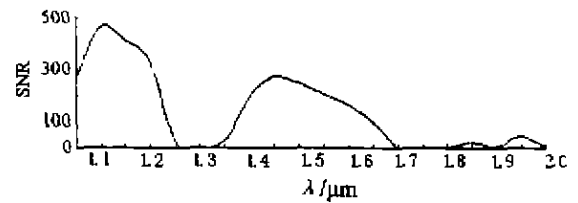


图4 短波红外波段I信噪比曲线

Fig.4 The SNR curve of SWIRI band

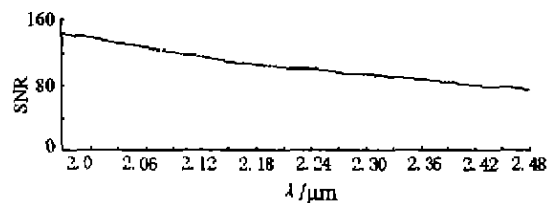


图5 短波红外波段II信噪比曲线

Fig.5 The SNR curve of SWIRII band

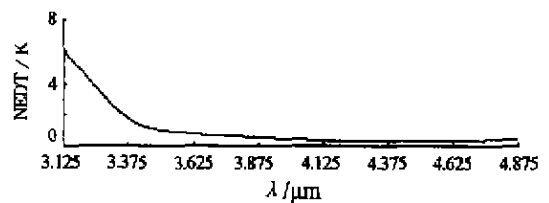


图6 中红外波段噪声等效温差曲线

Fig.6 The NEDT curve of MWIR band

表 3 OMIS 遥感作业一览表

Table 3 The remote sensing application overview of OMIS

序号	飞行地点	飞行目的	飞行面积
1	石家庄	农作物识别和理化特性诊断	110km ²
2	石家庄	城市环境、交通流量、土地利用调查	300km ²
3	辽东湾及辽河入海口	海洋水质环境监测	600km ²
4	内蒙古奈曼旗	荒漠化地区植被及土壤分类	1150km ²
5	涿州	军用目标特征及伪装揭露试验	29km ²
6	太湖吴淞江及苏州河	水环境监测	300km ²
7	黑龙江塔河	通过植被光谱分析找矿	360km ²
8	北京中关村	机载对地观测综合实验	480km ²
4	延安地区	植被覆盖率监测	900km ²
10	银川汝其沟、乌达等地	煤田自然监测	190km ²
11	日本名古屋	植被、农业、海岸、热排放等遥感应用研究	480km ²

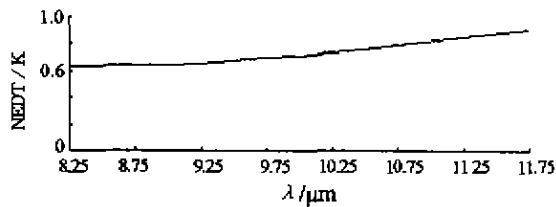


图 7 热红外波段噪声等效温差曲线

Fig. 7 The NEDT curve of LWIR band

对于可见/近红外(0.46~1.1 μm)、短波红外 I(1.06~1.7 μm)、短波红外 II(2.0~2.5 μm)等太阳反射波段,可以用信噪比(SNR)来表征各个波段的探测灵敏度。对于中红外(3~5 μm)、热红外(8~12.5 μm)等地球辐射波段,各个波段的探测灵敏度可以由噪声等效温差(NEDT)来表征。图 3~7 表示出了整个系统各个波段的探测灵敏度情况。

3 OMIS 在遥感领域的应用

OMIS 系统从 2000 年到现在先后成功执行了 10 项以上遥感飞行作业任务(见表 3)、总作业面积约 5000km²、总数据量超过 150GB。其中 2001 年 8 月到 9 月在日本名古屋进行的中日联合遥感试验中,OMIS 在名古屋、东京等地进行了若干架次的遥感作业,获得了高质量的遥感数据,取得了很好的国际声誉。

图 8~11(参见彩色插页 4)是 OMIS 遥感飞行获得的一些 3 波段合成图像。

4 结语

OMIS 在国内外多次成功进行的遥感作业任务充分验证了 OMIS 成像光谱仪系统在技术设计上的合理性,特别是在提高光谱分辨率、拓宽光谱覆盖、提高信噪比以及成像光谱数据定量化等关键技术研究方面取得的技术进步。OMIS 全波段连续的光谱覆盖以及较高的光谱分辨率等先进的性能指标,使它在地质、农业、林业、海洋和城市等遥感领域有着广阔的应用前景。另外,我们将对 OMIS 作一些改进工作,以进一步提高 OMIS 的实用化水平,特别是使短波红外(2.0~2.5 μm)32 个通道的探测灵敏度得到明显的改善。

REFERENCES

- [1] XUE Yong-Qi. The technical development of airborne scan imaging systems. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (薛永祺. 机载扫描成像系统的技术发展. 红外与毫米学报), 1992, 11(3): 169—180
- [2] WANG Jian-Yu, XUE Yong-Qi. 64-band airborne imaging spectrometer. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (王建宇, 薛永祺. 64 波段机载光谱成像仪. 红外与毫米学报), 1992, 11(3): 181—188

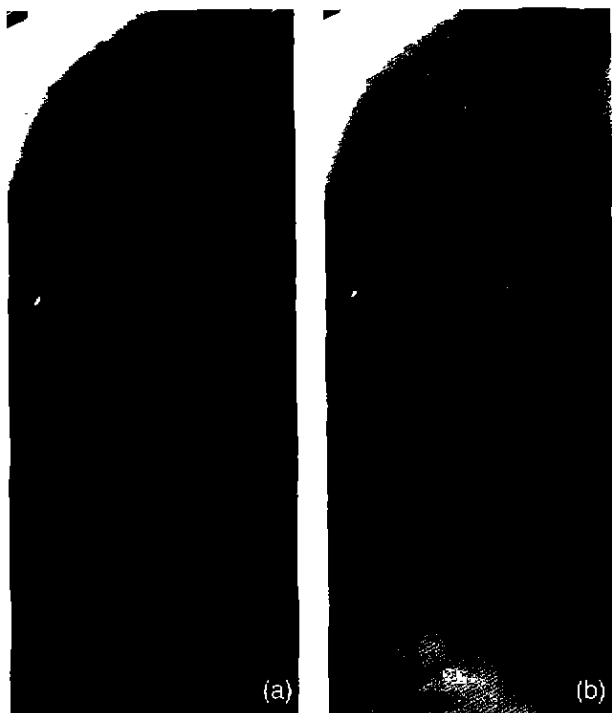


图8 辽东湾海藻图像(2000年6月,飞行高度1500m)

(a) R:8082nm, G:750nm, B:670nm

(b) R: 865nm, G:750nm, B:565nm

Fig.8 Image of part of algae in Liaodongwan
(June,2000, flight height: 1500m)



图9 奈曼旗荒漠化图像

(2000年6月,飞行高度1700m)

R:1653nm, G:1053nm, B:675nm

Fig.9 Image of desertification in Naimanqi
(June,2000, flight height: 1700m)



图10 北京中关村局部图

(OMIS2,2000年11月,飞行高度1000m)

R:8 ~ 12.5 μ m, G:888nm, B:608nm

Fig.10 Image of part of Zhongguancun in Beijing
(OMIS2,November,2000, flight height: 1000m)

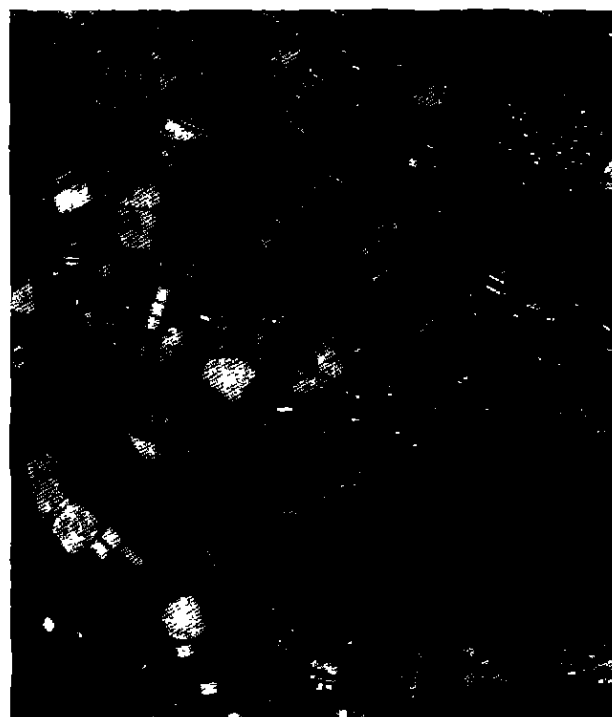


图11 日本名古屋局部图像

(2001年8月,飞行高度1470m)

R:4732nm, G:1069nm, B:684nm

Fig.10 Image of part of Nagoya in Japan
(August,2001, flight height: 1470m)