

# 遥 感 物 理 讲 座

## 第一讲 遥感的原理及应用

吕 斯 骅

(北京大学物理系)

遥感技术, 目前已成为一个国际性的研究课题, 而且正在迅速地扩大其范围. 它为人类提供了探测地球表面及其他星球的手段, 使人类对整个世界的认识发生了很大的变化. 正因如此, 它受到了各国的普遍重视.

遥感的历史可追溯到 1858 年 Laussedat 用气球携带相机拍摄的巴黎“鸟瞰”象片, 这是最早获得的遥感资料. 在此后近一百年内, 特别是两次世界大战中由于军事上的需要, 使黑白航空摄影和彩色航空摄影有了显著的进步. 这时使用的电磁波波段基本上限于可见光, 运载工具以飞机和气球为主. 本世纪六十年代以后, 随着人造卫星、宇宙飞船和航天飞机等一系列新型运载工具的出现, 同时遥感器的的工作波段也从紫外、可见、红外一直扩展到微波波段, 从而使遥感技术有了飞速的发展. 六十年代初, 也正式出现了遥感 (remote sensing) 这个专用名词.

遥感技术的发展虽然有其强烈的军事背景, 但是在探测地球和其他星球方面均取得了重大的成果, 如探测月球的阿波罗飞船、探测金星和火星的水手飞船和海盗飞船以及探测木星先驱者飞船等都发回了大量资料, 使人类对这些星球有了新的认识. 然而, 人类最关心的是地球自身, 关心地球的气候、环境、资源、粮食生产等一系列与人类生存有关的重大课题. 近年来发射的研究地球的卫星就有: 气象卫星系列、陆地卫星系列、海洋卫星系列、测地卫星系列和地球物理卫星系列. 表 1 中列出了一些有代表性的卫星. 这些卫星以极高的速度发回大量的

资料和图象, 如陆地卫星每隔十八天就可以把全世界扫描一遍, 诺阿气象卫星则每天都扫描一遍, 而与地球轨道同步的气象卫星则每时每刻监视地球的每一个角落. 这些资料可用于研究气象、农业、林业、地质、地貌、石油、海洋和水产等各个领域. 这些卫星构成了一个完整的地球环境卫星遥感体系. 这个体系使人类能从全球大小的尺度来研究地球得到地球瞬时变化的信息, 从而使人们能从大气、陆地和海洋等几个侧面以及它们之间的联系来寻找整个地球环境和各个环境要素之间的内在联系的规律.

### 一、遥感的物理基础

遥感的物理过程如图 1 所示. 在可见和近红外波段辐射源 (如太阳) 发射的电磁波, 通过大气层射向目标. 目标反射的电磁波再穿过大气被遥感器接收. 遥感器上的发报机将接收的信息传至地面控制中心, 在那里信息经过校正、增强等一系列处理, 绘制成各种图象供使用.

#### 1. 辐射源

在  $0.3$  至  $2.5 \mu\text{m}$  的紫外、可见和近红外波段, 主要的辐射源是太阳. 太阳可近似看作一个  $6000 \text{ K}$  的黑体辐射源, 它辐射的峰值在  $0.47 \mu\text{m}$  附近. 太阳光谱从  $0.1 \text{ nm}$  或更短的 X 射线一直延伸到微波波段, 但是其  $99\%$  的能量集中在  $0.276$  至  $10.94 \mu\text{m}$  波段. 从地面看, 太阳的张角约为  $0.5^\circ$ , 故太阳可认为是一个很好的平行光源.

太阳是被动遥感 (即遥感器不发射电磁波)

表1 地球轨道卫星系列

气象卫星系列	极地轨道气象卫星	雨云—G (Nimbus-G)	1978 美
		泰罗斯—N (Tiros-N)	1978 美
		诺阿-6 (NOAA-6)	1979 美
		诺阿-7 (NOAA-7)	1981 美
		流星 II-6 (Meteop II-6)	1980 苏
	同步轨道气象卫星	气象卫星-2 (Meteosat-2)	1981 欧空局
		同步环境应用卫星-5 (GOES-5)	1981 美
		同步气象卫星-2 (SMS-2)	1975 美
		同步气象卫星 (Metlor)	1978 苏
		对地静止气象卫星-1 (GMS-1)	1977 日
	向日葵	1981 日	
陆地卫星系列	陆地卫星-1 (Landsat-1)	1972 美	
	陆地卫星-2 (Landsat-2)	1975 美	
	陆地卫星-3 (Landsat-3)	1978 美	
	陆地卫星-4 (Landsat-4)	1982 美	
	热密度制图卫星 (HCMM)	1978 美	
	流星-自然卫星-5 (Meteopl-5)	1980 苏	
	巴斯卡拉-2 (Bhaskara-2)	1981 印	
	实验地球观察卫星 (SPOT)	1985 法	
海洋卫星系列	地球观察卫星-1 (EOS-1)	1988 日	
	海洋卫星-1 (Seasat-1)	1978 美	
测地卫星系列	海洋观察卫星-1 (MOS-1)	1986 日	
	激光测地卫星 (Lageos)	1976 美	
地球物理卫星系列	立体测量卫星 (Stereosat)	1985 美	
	地磁测量卫星 (Magsat)	1979 美	
	重磁场观察卫星 (Magras)	1981 日	

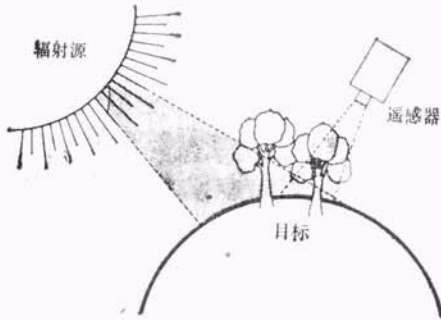


图1 遥感的物理过程

中主要的辐射源，但是利用太阳的被动遥感只能在晴朗的白天工作，没有全天候工作的能力。

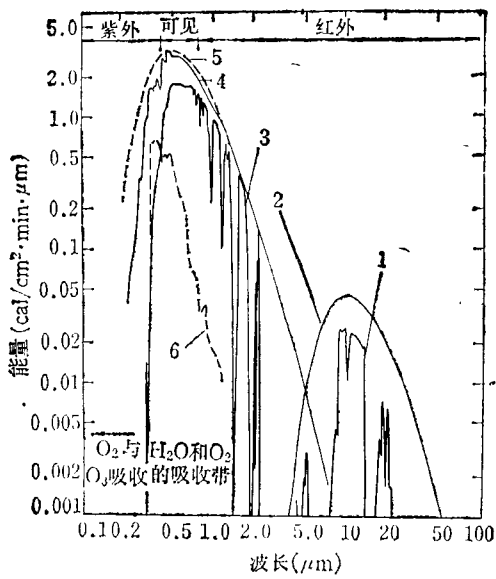
被动遥感中另一个重要的辐射源是地球自身。地球可以近似为一个 300 K 的黑体，它的辐射峰值在  $10 \mu\text{m}$  附近，正好落在 8 至  $14 \mu\text{m}$  的大气窗口内，因而遥感中常把 8 至  $14 \mu\text{m}$  称为热红外波段。地球的热辐射来源于太阳的辐

照，各种地物反射阳光的能力有差异，地物自身的热惯性和比辐射率也不尽相同，所以各种地物的热辐射亮温有很大的差异。遥感器就是根据此来区别各种地物。热红外遥感器除了白天能工作外，还能在夜间工作，它对云雾的穿透能力也比可见光强。

从图 2 可见，地球在  $0.3$  至  $2.5 \mu\text{m}$  的短波部分以反射太阳光为主，地球的热辐射可忽略不计。在 8 至  $14 \mu\text{m}$  的长波部分则以热辐射为主，太阳反射的强度可忽略。而在这两者之间的中红外波段，热辐射和太阳反射的影响均要考虑，不能偏废。

主动遥感中，遥感器自身发射电磁波。例如，侧视雷达自身发射微波，接收的是被地物反射的回波，由于微波穿透云雾的能力极强，因此是一种能全天候工作的遥感器。

## 2. 大气对电磁波传播的影响



1. 地面向空间的辐射 (0.10 cal/cm<sup>2</sup>·min) 地球的长波辐射的重要吸收带
2. 300K 黑体辐射 (0.67 cal/cm<sup>2</sup>·min)
3. (日地平均距离处) 太阳直射在地面的辐射功率 (1.3 cal/cm<sup>2</sup>·min)
4. 大气顶外太阳辐射 (2.0 cal/cm<sup>2</sup>·min)
5. 6000K 黑体辐射 (2.3 cal/cm<sup>2</sup>·min)
6. 漫入射到地球表面的功率 (0.14 cal/cm<sup>2</sup>·min)

图2 太阳与地表辐射的电磁波谱

无论电磁波从太阳射向地球还是从地面射向遥感器,均要穿过大气层。从物理的角度看,电磁波经过大气层时要被吸收和散射,其强度、传播方向及偏振状态均要改变。

大气中占99%的氮气和氧气都是没有固有偶极矩的双原子分子,因此在吸收光谱中没有它们的振动和转动光谱,但是有很强的电子

跃迁光谱。N<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>的吸收作用,使波长小于0.24 μm的大气成为不透明。O<sub>2</sub>的电子跃迁在0.76及1.27 μm附近产生两个弱吸收带。波长大于0.24 μm电磁波的吸收,主要是大气中含量极少的O<sub>3</sub>,CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O等一些具有固有偶极矩的分子引起的。在30 km的高度,大气有一个浓度较大的臭氧层,它对紫外光有极强的吸收,使波长小于0.3 μm的紫外光不能到达地面。臭氧在9.6 μm还有一个强吸收峰,它对卫星上的遥感器有影响,而对飞行高度小于10 km的机载遥感器影响不大。CO<sub>2</sub>在2.7 μm,4.3 μm和14.5 μm处有强的吸收。H<sub>2</sub>O的吸收对大气的影 响更为广泛,从可见、红外直至微波,到处可以发现H<sub>2</sub>O的吸收带。它在2.5至3.0 μm及5.0至7.5 μm有两个强吸收带。由于H<sub>2</sub>O的吸收,波长大于24 μm的大气几乎成为完全不透明的,在16至24 μm的波长范围内,也吸收了大部分能量。在微波波段,H<sub>2</sub>O在0.94 mm,1.63 mm及1.35 cm处也有三个吸收峰。

综合各种气体吸收的影响,大气只有某些波段的透过率比较高,这些波段称为大气窗口。常用的大气窗口有:0.3—2 μm,3—5 μm,8—14 μm。在微波区,可采用的大气窗口有1.4 mm,3.3 mm,8 mm及1.6 cm至15 m。

在应用遥感技术(如地球资源卫星和侦察卫星等)研究地球表面的状况以及通讯时,工作波段必须选择在大气窗口内,而在一些特殊应用中却特意选择这些非透明波段,例如一些

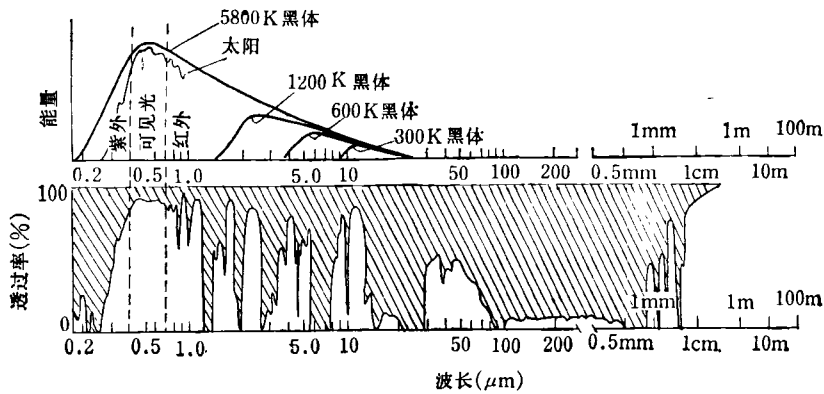


图3 大气透过率随波长的变化

气象卫星就选择  $H_2O$ ,  $CO_2$  和  $O_3$  的一些吸收带, 测量它们的含量及温度分布等。

在大气窗口内, 散射的影响就成为主要的了。散射的影响可表现为下列几方面:

- (1) 使到达地面的辐射削弱, 或地面向外的辐射减弱。
- (2) 改变了太阳辐射的方向。太阳辐射的大部分能量仍以原来的方向射到地面, 而散射的太阳光以漫入射的形式辐照地面。
- (3) 散射光中一部分向下, 还有一部分向上散射进入遥感器, 使图象的对比度减小。

大气的散射可分为瑞利散射和米氏散射两种。

瑞利散射是由比波长小得多的空气分子的涨落所引起的。由于瑞利散射与  $\lambda^{-4}$  成正比, 故散射强度随波长的增加很快地减小, 例如  $\lambda = 4 \mu m$  的红外光, 其散射强度只有  $\lambda = 0.4 \mu m$  的紫光散射强度的万分之一。瑞利散射对可见光的影响较大, 而对红外辐射的影响就很小了, 对微波的影响更可忽略不计。瑞利散射引起的衰减比较稳定, 与气候变化没有什么关系。

米氏散射是大小与波长相近的粒子如烟、气溶胶等的散射引起的。米氏散射强度与能见度、微粒的结构、数量及它们的光学性质有关, 故受气候影响较大。当微粒的尺寸远大于波长时, 散射强度则与波长无关。我们看到的云、雾都是由比较大的水滴组成的, 它们的散射与波长无关, 因此看起来是白色的。

在大气窗口内, 辐射的衰减主要是散射引起的。散射衰减的类型与强弱和波长密切相关, 如云中的小水滴对可见光的散射是与波长无关的, 而对微波波段, 雨滴的直径则小于微波波长, 因而属于瑞利散射。因瑞利散射强度与  $\lambda^{-4}$  成正比, 而微波波长比可见光的波长长 1000 倍以上, 散射强度要弱  $10^{-12}$  倍以下, 因此微波有极强的穿透云层的能力。红外辐射穿透云层的能力虽不如微波, 但比可见光穿透能力要大 10 倍以上。

大气对辐射信号的影响表现在衰减有用信号和增加有害的大气辐射信号两方面。遥感器

发送的信号与物体的辐射亮度成正比。在高度为  $h$  的飞行平台上, 观察地面物体的辐射亮度  $L$  为

$$L = L_g T(h) + L_p,$$

式中  $L_g$  为地面物体的辐射亮度,  $T(h)$  为地面至  $h$  的大气层的透过率,  $L_p$  为地面至  $h$  的大气柱向上的辐射亮度, 这些量都是波长、大气层厚度、大气的吸收系数和散射系数以及观察角度的函数。由于  $L_p$  的影响, 使得遥感图象的对比度比地面看到的实际对比度要小得多。而且  $L_p$  和  $T(h)$  等量还与大气的状态有关, 例如雨后大气中尘埃较少, 透过率就增加,  $L_p$  也减小, 而刮风、有风沙时, 透过率减小,  $L_p$  也增大。 $T(h)$  和  $L_p$  还与地区有关, 如城区尘埃较多,  $T(h)$  小、 $L_p$  大, 而山区一则尘埃少, 二则海拔较高, 故  $T(h)$  大,  $L_p$  小。如何正确地修正大气对辐射信号的影响, 仍是目前遥感研究的课题之一。

### 3. 地物的光谱特性

如图 2 所示, 在可见及近红外波段主要考虑地物的反射特性, 用反射率  $\rho$  表示。反射率是波长的函数, 图 4 为几种典型地物的反射率曲线。如植被在  $0.45$  和  $0.67 \mu m$  有两个反射谷, 在  $0.55 \mu m$  处有一反射峰, 故植被看起来是绿色的。植被在红外反射率急剧增加, 人眼不能看到, 但在红外假彩色照片中(在此彩色照片中蓝、绿色光呈蓝色, 红色光呈绿色, 红外光呈红色), 植被就呈显明的红色。水体在蓝波段的反射率较高, 在红外反射率极低, 故在红外假彩色照片中呈深蓝色或黑色。而砂地的反射率随波长的增加而增加, 故在照片中呈淡黄色。

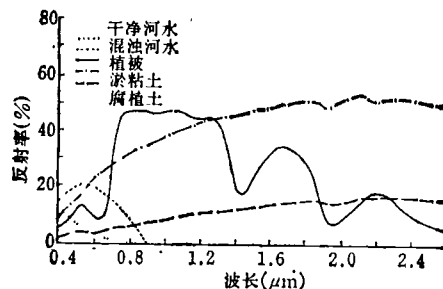


图 4 几种典型地物的光谱特性

表 2

无 源 方 式				有 源 方 式	
紫 外	可 见 光	红 外	微 波	紫外、可见、红外	微 波
分光计 照相机	高分辨照相机 全色照相机 多波段照相机 电视摄像机 多波段扫描仪	红外扫描仪 红外辐射计 近红外照相机 红外成像仪	辐 射 计 扫 描 仪	激光高度计 激光散射计 喇曼散射计 萤光散射计	侧视雷达 高 度 计 散 射 计

地物的光谱特性是设计传感器和判读遥感图象的依据,研究各种地物的光谱特性找出传感器工作的最佳波段是遥感的一项基础工作。

#### 4. 传感器

传感器按工作方式可分为有源和无源两类,也可分为成象和非成象两类。

可见和红外遥感大多数是无源的,只有距离较近时才用有源的激光传感器。在微波波段,除了微波辐射计及其扫描仪外,大多是有源的。

目前使用得最多的还是可见至近红外的光学成象传感器如照相机、电视摄像机和多波段扫描仪等,它们约占传感器的60%左右。这主要是因为它们的几何分辨率高,成本较低,所得的照片易于判读。微波传感器近几年来发展很快,特别是合成孔径侧视雷达出现之后,使雷达成象的几何分辨率可以与可见光图象媲美。但其设备庞大,成本极高不易于普遍推广。

传感器的研制工作涉及物理学、电子学、材料科学和精密机械加工等许多领域,需要各学科共同努力才能完成。各类传感器的结构和原理我们将在第三、四讲中详细介绍。

## 二、遥感的应用及展望

采用遥感技术特别是采用卫星遥感影象,具有调查面积大、周期快,应用面广和适于反映动态变化等优点。表3列出了陆地卫星的一些实际应用,从中我们可以看到它对国民经济是非常有用的。例如,我国地质部已规定:凡物

表 3 陆地卫星的一些实际应用

应用领域	应 用 方 面
农业和林业	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 勘察病虫害,旱灾,火灾,研究其发生,蔓延及结果</li> <li>2. 调查农作物和树木的种类和长势</li> <li>3. 探索最合理的水利灌溉管理方案</li> <li>4. 农林资源清查及土壤制图</li> <li>5. 农作物产量的估测和预报</li> <li>6. 物候研究</li> </ol>
地理和地质	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 区域制图和找矿</li> <li>2. 火山活动的监视和火山爆发的探测</li> <li>3. 地震的监视与预报</li> <li>4. 地热异常调查</li> <li>5. 动力地貌过程,如风沙移动,河床演变等的监视</li> <li>6. 水文地质研究</li> <li>7. 编绘和修改地图</li> <li>8. 土地利用研究</li> <li>9. 研究农林和城市发展动向及人口变迁</li> <li>10. 交通网的研究</li> <li>11. 自然环境及变迁综合研究</li> <li>12. 环境污染监测</li> </ol>
水文和海洋	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 流域调查和规划</li> <li>2. 水源探测和积雪调查</li> <li>3. 洪水监测,估算和预报</li> <li>4. 地下水溢出和主要河流流量</li> <li>5. 湖泊状态及其特点的研究</li> <li>6. 水污染的监测</li> <li>7. 确定海水中淡水泉涌出位置</li> <li>8. 确定河口,海岸的动态变化和泥沙运动</li> <li>9. 海流和海冰监视</li> <li>10. 海况测定</li> <li>11. 浅海地形制图</li> <li>12. 渔群探测和定位</li> <li>13. 海面油染污</li> <li>14. 研究海底藏油位置,促进大陆架开发</li> <li>15. 确定海底生物丰富区域</li> </ol>

矿藏勘察成果时必须要有遥感资料的分析结

果。我国地质工作者根据遥感影象在古河道中找到了金。在铁路施工过程中，工程技术人员根据卫星影象找到了以前没有发现过的断裂带，从而让铁路避开了该断裂带，消除了工程中的隐患。科技人员还根据卫星影象纠正了原来森林分布图中的分类错误。

气象卫星的资料除了用来分析气象状况，预报天气以外，还可以根据海洋温度场的分布来预报渔汛，预报森林火灾及作物长势等。

1976年5月发射的激光测地卫星表面装有426块角反射器，它能使激光束按原方向返回。卫星保持在一条比较稳定的轨道上，以测量地球的运动和地球动力学的其他参数，在全球测量精度为10cm。它可用来测量断层运动、板块运动、地极和自转轴的移动和地球的固体潮汐等，测量结果也有助于弄清地震机理。

微波遥感器最大的特点是具有全天时（昼夜工作）、全天候（穿过云、雾和雨）的能力。它可探测森林、沼泽和草原等地下水文和土壤状况，确定雪覆盖层的表面特征和覆盖层下面的物质形态。微波遥感器特别适用于海洋。由于微波对海水的导电性能很敏感，所以可用来测量海洋的盐度。微波对海面的粗糙度十分敏感，因而可测量海风速度、风向及波浪的高度。由于海冰和海水在微波波段的比辐射率相差极大，两者的亮温差100K以上，用微波辐射计能明显地把两者区分开，而在可见和近红外波段两者的区别则不甚明显。

随着科学技术的发展，遥感器光谱波段的选择趋向更加合理，地面几何分辨率也逐渐提高。陆地卫星-1中用的多谱段扫描仪的几何分辨率为79m，分为四个波段。0.5—0.6 $\mu\text{m}$ ，0.6—0.7 $\mu\text{m}$ ，0.7—0.8 $\mu\text{m}$ 和0.8—1.1 $\mu\text{m}$ ，而陆地卫星-4中的主题制图仪的几何分辨率提

高到30m，分为七个波段：0.45—0.52 $\mu\text{m}$ ，0.52—0.60 $\mu\text{m}$ ，0.63—0.69 $\mu\text{m}$ ，0.76—0.90 $\mu\text{m}$ ，1.55—1.75 $\mu\text{m}$ ，2.08—2.35 $\mu\text{m}$ 和10.4—12.5 $\mu\text{m}$ 。1986年法国发射的SPOT卫星几何分辨率为10m。2000年之内计划发射的地球同步观察系统（GEOS）使用大型对地观察望远镜，其焦距为24m，主反射镜的直径为8m，地面几何分辨率为3m。它将用航天飞机分批送上轨道。

随着几何分辨率的提高，从卫星传送到地面的信息量大增，形成信息泛滥。因而必须将数据处理及信息提取功能也放在卫星上，形成新的智能遥感器。例如，测量大地构造的构造仪（TEXTUROMETER），其望远系统的焦距为600m，它从600km的高空可测量1mm至1m的明显的构造图形。在焦平面上的电荷成像装置接收的信号，经过处理装置变成空间频率信号传送到地面，从而减少了信息量。

微波遥感器是今后十几年内发展的重点。其中大型的微波遥感器有伞式辐射计（PARASOLRADIOMETER）和转轮雷达（FERRIS WHEEL RADAR）。伞式辐射计是一个雨伞样的大型相控天线阵，直径达10km，为一微波辐射计。由于雷达的地面几何分辨率与天线尺寸成反比，故伞式辐射计可提供高分辨率的土壤湿度信息。转轮雷达的天线尺寸更大，直径达30km，并在太空中旋转。根据微波有穿透地表的能力，它被用于测量地下边界层的结构。对不同的岩石、不同的深度，使用不同的波长。如果这一装置试验成功，将彻底改变传统的用钻机勘探地质结构的办法，这将是地质工作的一场大革命，因而此轮转雷达亦称为“地质学的梦幻”。

（上接第500页）

### 参 考 文 献

- [1] L. C. Caplan, R. Stern, *Rev. Sci. Instrum.*, **5**(1971), 689.  
[2] 中国科学院物理研究所弱信号检测小组, *物理*, **6**(1977), 335.

- [3] 黄金林等, *电子技术*, **9**(1979), 24.  
[4] 秦世才编著, *集成运算放大器应用和原理*, 天津人民出版社, (1979), 186.  
[5] 上海半导体器件研究所, *上海半导体*, **2**(1982), 91.  
[6] R. L. Park, J. E. Houston, *J. Vac. Sci. Technol.*, **11-1**(1974), 1.  
[7] 华中一, *真空*, **1**(1979), 1.