

# CCD 瞬态光谱仪的研制

陈 迈

(中国科学院上海技术物理研究所)

**摘要**——本文报道一种 CCD 瞬态地物光谱仪, 其工作波长为 0.4~1.1  $\mu\text{m}$ 。给出光谱仪工作原理、设计思想以及利用微处理器完成一次测量和数据处理的具体过程和方法。讨论了最小二乘数据平滑和各阶微分的最佳权重选择; 还给出光谱仪定标、误差分析及实验室测试和野外实验结果。

## 一、引 言

研究和测量地物光谱反射、辐射特性是地面实况调查的重要组成部分, 是应用和发展遥感技术的基础和重要研究内容。0.4~1.1  $\mu\text{m}$  波段是反映一切植物、林木、土壤等地物目标状态的灵敏波段, 在这个波段研制具有高光谱分辨率的地物光谱仪是具有现实意义的。

已研制成功的瞬态光谱仪采用固定的 CCD 多元探测器代替传统的单元探测器及机械扫描装置。由于光谱仪不采用活动部件, 不仅结构简单、坚固、体积小、重量轻、功耗低、测量时间短、适合野外工作, 而且光谱仪的波长定位精度主要决定于 CCD 探测器光敏元线度, 具有定标方便、精度高、温度稳定性好等特点。各光谱通道信号采用同时并行采样积分探测, 有利于补偿测量中所受到的环境和光照变化的影响; 采用可变时间积分读出方式, 光谱仪具有较高动态范围, 对复杂多变的野外光照条件能保证一定的分辨能力。

## 二、工 作 原 理

图 1 是瞬态光谱仪工作原理方框图。

光谱仪在其工作范围内是一理想的线性系统。考虑探测器的实际工作, 可描述为相应于入射波长在  $\Delta\lambda$  范围内, CCD 单元中光生载流子数为

$$S(\lambda) = \eta(\lambda) \cdot \theta(\lambda) \cdot t \cdot A_0 \cdot \omega T_0(\lambda) \cdot \Delta\lambda + S_d \quad (1)$$

式中,  $\eta(\lambda)$  为 CCD 探测器量子效率;  $\theta(\lambda)$  为单位时间内目标反射的光子光谱辐亮度;  $t$  为 CCD 探测器目标信号

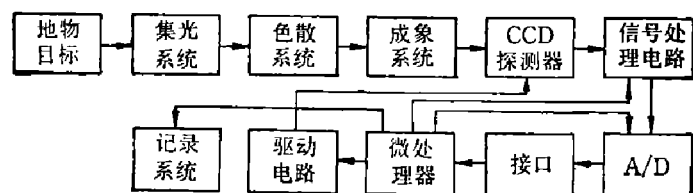


图 1 瞬态光谱仪原理框图

Fig. 1 Block diagram of the transient spectroradiometer.

本文 1986 年 9 月 25 日收到。

积分时间;  $\omega$  为系统视场角;  $A_0$  为光谱仪有效入瞳面积;  $T_0(\lambda)$  为光学系统光谱透射率;  $\Delta\lambda$  为由 CCD 光敏元线度规定的色散波长宽度;  $S_d$  为探测器热生及剩余杂散光引起的附加载流子数。

常温地物在  $0.4\sim 1.1\ \mu\text{m}$  波段内对太阳辐射有反射, 其自身辐射可以忽略, 因此有:

$$\theta(\lambda) = \frac{\lambda E_0(\lambda)}{\pi h c} \rho(\lambda, \theta_s, \varphi_s, \theta_i, \varphi_i) \tau(\lambda) \cos\theta; \quad (2)$$

式中,  $E_0(\lambda)$  为地物目标上的太阳天顶方向辐照度;  $\rho(\lambda, \theta_s, \varphi_s, \theta_i, \varphi_i)$  为地物目标双向反射率; 其中,  $\theta_i$  为测量的入射角,  $\theta_s$  为太阳天顶角;  $\tau(\lambda)$  为目标与光谱仪间大气光谱透射率。为消除野外测量中太阳辐照及环境因素的影响, 用一反射率已知的标准白板作为当时当地照明条件的标定基准。假定在测量过程中太阳辐照及光谱仪视场等条件均不变, 分别测量地物及标准板即可得到地物光谱反射率信息

$$\rho_{\text{目标}}(\lambda) = \frac{S_{\text{目标}}(\lambda) - S_d}{S_{\text{标准}}(\lambda) - S_d} \cdot \rho_{\text{标准}}(\lambda)。 \quad (3)$$

### 三、瞬态光谱仪总体设计

#### 1. 光学系统

图 2 是光学系统原理图。地物目标的反射光谱信号通过望远镜集光系统成准平行光束

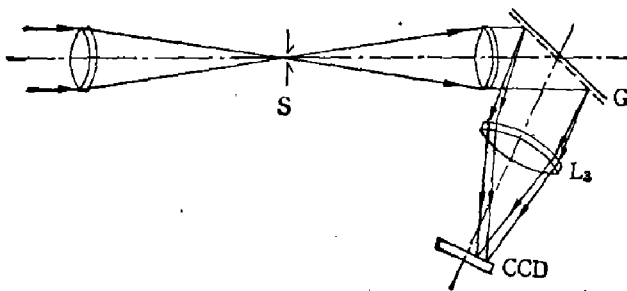


图 2 光谱仪的光学系统原理图

Fig. 2 Schematic of optical system of the spectroradiometer.

照射在平面闪耀光栅上, 经光栅色散, 由成象透镜组将系统视场光阑的色散象成象于 CCD 探测器线列光敏元上。根据 CCD 光谱响应特性, 用截止型滤光片消除光栅二级色散光谱。CCD 输出的光谱信号经过信号处理电路在光学头部输出端输出  $0\sim 10\ \text{V}$  串行分时信号。

平面闪耀光栅刻线密度为 600 线对/mm; 闪耀波长为 750 nm; 选取光栅色散角

$\varphi$  时综合考虑了光栅在整个光谱工作区的衍射效率、色散线度, 及实际光学元件安排是否紧凑合理等影响。理论分析和实际测试表明, 选取  $\varphi=50$ , 可以兼顾各方面因素, 并保证在整个光谱区光栅色散的相对衍射效率优于 42%。

在保证光谱分辨率和高信噪比所需的一定采光量的同时, 还必须精密设计光路结构, 使集光系统与成象透镜组光瞳尺寸良好匹配, 以避免色散光束因不同色散角进入成象透镜光瞳而受到部分遮蔽的渐晕现象。

#### 2. 控制处理系统

由微处理器控制光谱仪测量的整个过程, 并对测量结果实时处理, 直接给出最后的光谱信息, 其硬件设计框图如图 3 所示。

根据打印机输出的状态信息及操作提示, 给出相应指令, 分别对标准板及目标连续作十次瞬态测量, 并取其平均值, 在每一次测量中, 光学头部输出的串行时分信号经 8 位 A/D 转换后直接由 DMA 馈入微处理器内存, 每下一次目标信号探测积分与前次光谱信号的

预处理同时进行。在对标准白板预测时,微处理器根据信号值大小自动选择最佳积分时间。测量结束,微处理器自动转入对原始数据作暗信号扣除、色散光谱校正、光谱反射率计算、宽波段通道积分计算、以及最小二乘的光谱数据平滑和微分运算。最后,按操作者的不同要求输出光谱信息。可以选择打印所需间隔波长的光谱反射率,及其一、二阶微分光谱数据和通道平均反射率数据;也可选择打印机点打或用 800 型绘图仪绘制各光谱曲线及用磁带记录光谱数据。

为适应瞬态光谱仪大信息量和快速实时处理的特点,软件设计要合理考虑运算速度和内存空间之间的矛盾,从采用大模块和专用化考虑,专门设计了一套配合光谱仪数据处理的双字长浮点运算程序库,占用内存略有增加,通用性稍有减弱,但运算速度有较大提高。整个光谱仪管理处理软件共 7K 字节,全部固化在 EPROM 内。

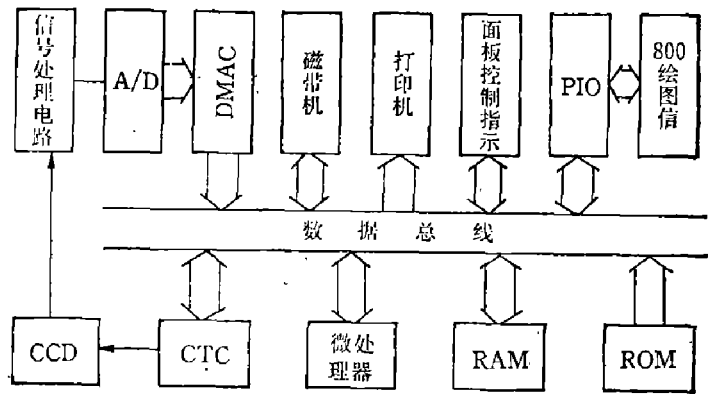


图 3 光谱仪控制处理系统框图

Fig.3 Block diagram of control and processing system of the spectroradiometer.

#### 四、最小二乘微分平滑参数的选取

光谱测量数据的最小二乘平滑及各阶微分处理,可以在一定程度上抑制测量中引入的随机误差,或提取光谱变化骤缓信息,但同时也会引起信号畸变。因此对于确定的仪器光谱分辨率,存在一个平滑宽度,拟合多项式幂次以及平滑次数等参数的最佳选择问题。

Savitzky coloy<sup>[3]</sup> 及 Steiner<sup>[4]</sup> 的研究已经从理论上解决了实现平滑及各阶微分的最小二乘处理的主要问题。一组光谱信号中某一光谱点的平滑及各阶微分值可以由此光谱点,以及相邻对称的  $2m$  个光谱点的信号值求出:

$$\hat{s}_i^{(s)} = \sum_{j=-m}^m c_j^{(s)} s_{i+j}; \quad (4)$$

式中,  $s=0, 1, 2, 3, \dots$  为微分阶数,  $c_j^{(s)}$  为  $s$  阶微分平滑的加权系数,  $s_{i+j}$  为未经微分平滑处理的光谱数据。

文献[3, 4]只给出部分拟合多项式幂次较低的不同平滑宽度加权系数。为深入研究不同参数选择对特定分辨率场合的数据平滑和微分结果的影响,避免 Steiner 等人给出的复杂的高阶矩阵运算带来的麻烦,本文给出加权系数求解的另一种推导。

假定一组等间隔离散点  $s(1), s(2), \dots, s(n)$ , 其中任意第  $i$  个离散点的测量值  $s(i)$  可以用一个  $N$  阶多项式和一个随机误差函数  $\epsilon(i)$  的线性和表示:

$$s(i) = p(i) + \epsilon(i); \quad (5)$$

随机误差函数  $\epsilon(i)$  有

$$\begin{aligned} E[\epsilon(i)] &= 0; \\ D[\epsilon(i)] &= \sigma^2. \end{aligned}$$

我们用等矩点正交多项式线性和表示多项式  $p(i)$

$$p(\hat{\nu}) = \sum_{s=0}^N a_s h_s(\hat{\nu}); \quad (6)$$

式中,

$$\begin{cases} h_s^{(k)} = \sum_{k=0}^s (-1)^k c_s^k c_{s+k}^k \frac{x^{(k)}}{(m)^{(k)}}; \\ \hat{\nu}^{(k)} = (\hat{\nu} + m), (\hat{\nu} + m + 1) \cdots (\hat{\nu} + m + k - 1); \end{cases} \quad (7)$$

且满足正交条件:

$$\sum_{i=-m}^m h_r(\hat{\nu}) \cdot h_s(\hat{\nu}) = \begin{cases} 0, & r \neq s \\ H(s, m), & r = s \end{cases} \quad (8)$$

若平滑宽度取  $2m+1$ , 记

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} s(-m) \\ s(-m+1) \\ \dots \\ s(0) \\ \dots \\ s(m) \end{pmatrix}; \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_0 \\ \dots \\ a_N \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} \epsilon(-m) \\ \dots \\ \epsilon(0) \\ \dots \\ \epsilon(m) \end{pmatrix}; \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_0(-m), h_1(-m), \dots, h_N(-m) \\ \dots \\ h_0(-m+1), h_1(-m+1) \cdots h_N(m+1) \\ \dots \\ h_0(m), h_1(m), \dots, h_N(m) \end{pmatrix};$$

则, 对于指定的分段区域各光谱点, 式(6)一般可表示为

$$\mathbf{S} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{A} + \mathbf{E}; \quad (9)$$

为估计系统矩阵  $\mathbf{A}$ , 根据最小二乘法原理, 最佳估计矩阵取残差平方和为最小, 即:

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{A}} [(\mathbf{H} \cdot \mathbf{A} - \mathbf{S})^T (\mathbf{H} \cdot \mathbf{A} - \mathbf{S}')] = 0;$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{C}^{-1} \cdot \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{S}; \quad (10)$$

式中

$$\mathbf{C} = \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{H} = \begin{pmatrix} H(0, m) & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & H(N, m) \end{pmatrix}. \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)有:

$$\hat{a}_k = \frac{1}{H(k, m)} \sum_{j=-m}^m h_k(\hat{\nu}) \cdot s(\hat{\nu});$$

因此,

$$P(j) = \sum_{k=-m}^m \left[ \sum_{k=0}^N \frac{h_k(\hat{\nu}) \cdot h_k(j)}{H(k, m)} \right] \cdot s(\hat{\nu}). \quad (12)$$

用相邻对称的离散点微分及平滑有:

$$\hat{s}^{(s)} = \left[ \frac{\partial^s}{\partial j^s} P(j) \right]_{j=0}$$

作简单的序数变换, 由式(4)得:

$$c_i^{(s)} = \sum_{k=0}^N \frac{\left[ h_k(\hat{\nu}) \cdot \frac{\partial^s}{\partial j^s} h_k(j) \right]_{j=0}}{H(R, m)}, \quad s=0, 1, 2, \dots; \quad (13)$$

容易证明,  $c_i^{(s)}$  具有简单的对称性:

$$c_i^{(s)} = (-1)^s c_i^{(0)}, \quad s=0, 1, 2, \dots; \quad (14)$$

对式(4)作简单变换有

$$\hat{s}_i^{(s)} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_k \cdot s_{i-k}^{(s)} \quad (15)$$

式中,

$$h_k^{(s)} = \begin{cases} (-1)^s c_k^{(s)}, & -m \leq k \leq m \\ 0 & \text{其它}, s=0, 1, 2, \dots; \end{cases}$$

因此, 平滑处理等效地经历了原始数据信号与加权系数相卷积过程, 也即最小二乘平滑实际包含了非递归简单低通滤波过程的性质, 其传递函数可表示为

$$H(f) = \mathcal{F}\{h_k\}. \quad (16)$$

为简化讨论, 用半宽等于光谱分辨率的高斯峰来表征系统的光谱线扩散函数, 并假定测量噪声为白噪声, 符合正态分布, 于是可以用经平滑滤波后高斯峰峰高的变化表征光谱线扩散函数的展宽, 白噪声功率谱均方根值的降低表征噪声抑制; 而两者相互作用的结果表征平滑滤波处理后信噪比的提高。信噪比提高因子可以表示为

$$(S/N)/(S/N)_0 = \frac{S/S_0}{\left[ \frac{1}{2B} \int_{-B}^B H^2(f) df \right]^{1/2}}; \quad (17)$$

式中,  $B$  为光谱信号波长采样间隔所确定的 Nyquist 频率。用式(17)分别对几种情况进行计算, 结果如图 4~6 所示, 选用 9 点宽三次幂一次平滑, 理论上可使信噪比提高 3.2 倍, 且表征光谱分辨率下降的高斯峰峰高降低为原来的 0.83 倍。

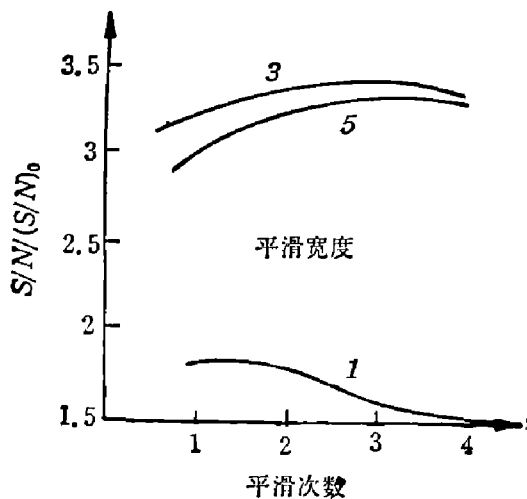


图 4 9 点宽平滑提高的 S/N

Fig.4 Enhancement of S/N for 9-point smoothing.

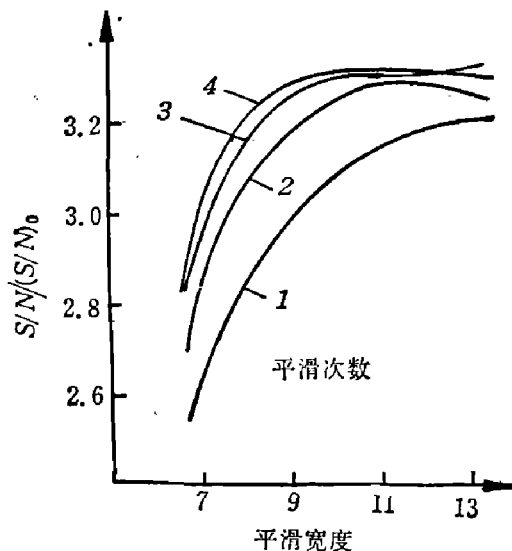


图 5 五次幂多项式平滑提高的 S/N

Fig. 5 Enhancemnt of S/N for 5th order polynomial.

同样的分析还表明, 最小二乘微分平滑等效地经历了理想微分和低通滤波过程, 其传递函数为

$$H^{(s)}(f) = \frac{1}{(2\pi f z)^s} \mathcal{F}\{h_k^{(s)}\}. \quad (18)$$

为获得微分光谱曲线的高保真效果, 选择尽量宽的滤波通频带是适宜的。因此, 选择较高幂次对获得较高的拟合精度有利。图 7 给出对半宽为光谱分辨率两倍的高斯峰作不同幂次多项式微拟合的实际计算结果实例。从而验证了上述结论的正确性。

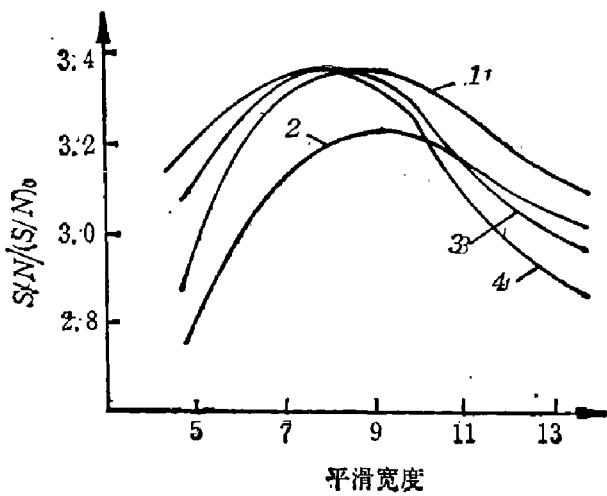


图6 三次幂多项式平滑提高的 S/N  
Fig. 6 Enhancement of S/N for 3th order polynomial.

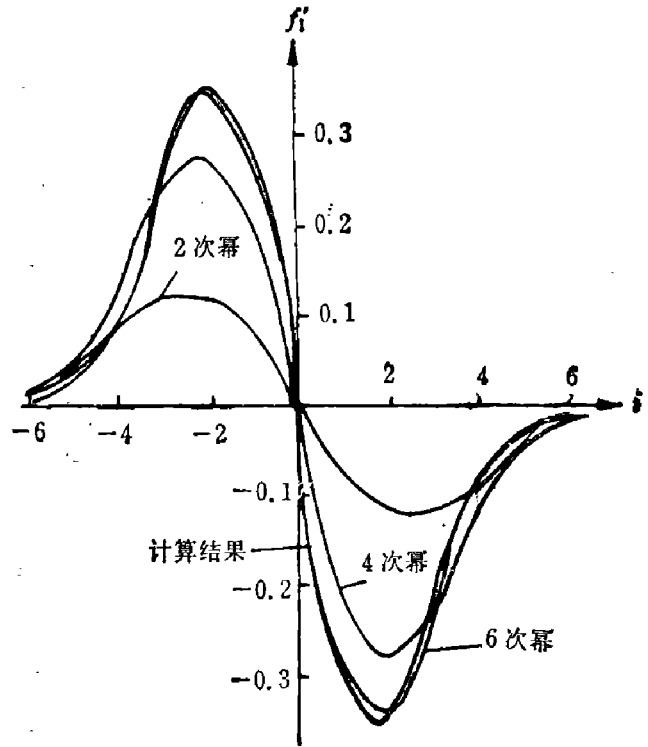


图7 不同幂次多项式微分拟合比较  
Fig.7 Comparison between fits of the derivative of different order polynomial.

## 五、主要误差分析和光谱仪标定

### 1. 非平行光光栅色散对象质影响的分析

本光谱仪整个光调过程依据一对同轴内调焦望远镜进行, 由于受光校仪器精度的限制, 实际的光栅色散不可能是严格的平行光, 从而使像质变差。对于非平行光的光栅色散, 象质评价函数可以用下式表示:

$$\phi = \left\{ \frac{1}{4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [(TA_x)^2 + (TA_y)^2] dx dy - \left[ \frac{1}{4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 TA_x dx dy \right]^2 - \left[ \frac{1}{4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 TA_y dx dy \right]^2 \right\}^{1/2}; \quad (19)$$

式中, 横向像差系数  $TA_x$ 、 $TA_y$  都可以用波像差求得:

$$\begin{aligned} TA_x &= -\frac{L^2}{s'} \frac{\partial \bar{W}}{\partial x}; \\ TA_y &= -\frac{L^2}{s'} \frac{\partial \bar{W}}{\partial y}; \end{aligned} \quad (20)$$

式中,  $s'$  为光栅色散象的象距,  $L$  为经成象透镜汇聚后成象的象距, 表1给出了几个发散角情况的计算结果。考虑成象透镜组视场中心分辨率为 50 线对/mm, 且视场光阑宽度为 0.2 mm, 因此只要控制非平行光束发散角小于  $2^\circ$ , 则此项不会对系统的光谱分辨率产生实际的影响。

### 2. 信号测量随机误差的分析

影响光谱仪测量精度的主要因素有: COD 及放大电路噪声量化误差、运算误差、测量过程中光照和环境变化引起的误差等。其中光照和环境变化引起的误差主要受光谱仪测量时

表1 非平行光色散象质评价

Table 1 Image quality evaluation of non-parallel dispersion

$\phi$ (mm)		$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )		
		0.40	0.75	1.10
$\varphi_0$ ( $^\circ$ )	1	0.00576	0.00587	0.00571
	2	0.0238	0.0238	0.0234
	5	0.195	0.186	0.198

间的限制,本光谱仪能够达到标准板与目标的测量间隔仅 2s,对减小这项误差有利。数据处理采用双字节浮点运算,作十次独立的重复测量,所对应的均方根相对误差为

$$r_1 = \left(2\sqrt{\frac{10}{3}} + 1\right)2^{-15} = 1.4 \times 10^{-4}.$$

CCD 器件及放大电路噪声主要有散粒噪声、固有噪声、放大电路热噪声及干扰噪声等,这几项噪声可以唯象地表示为

$$V_n = k\sqrt{V_s} + V_{n1}; \quad (21)$$

式中,  $k=0.0894(mV^{-\frac{1}{2}})$ , 为电荷与电压信号转换因子,  $V_{n1}=6\text{ mV}$ 。

量化误差可以用由随机噪声引起的正确量化概率的有效位描述。因此相对误差为

$$r = \frac{k}{\sqrt{12N_1N_2}} \cdot \frac{2^i}{250} \cdot \frac{1}{R(\lambda) \cdot \epsilon(\lambda) \cdot \rho}; \quad (22)$$

式中,  $k=2.13$ , 为置信系数;  $N_1=8$ , 为数据压缩校正信号数;  $N_2=10$ , 为彼此独立的等精度测量次数;  $\epsilon(\lambda)$  为太阳相对辐射光谱;

$$i = \text{INT} \left[ \log \alpha \frac{2.8V_n}{s} \right] + 1,$$

INT 为靠左取整函数;  $s=20\text{ mV}$ , 为 A/D 转换的量化步距。

### 3. 光谱标定

选用低压汞灯可见光区五组谱线的一、二级光谱作为标定基准,用理论的光栅色散曲线非线性因子对测量结果进行拟合。光谱仪对汞灯不同时间的多次测量表明,其重复性优于  $\pm 1.5\text{ nm}$ 。根据瑞利判据定义光谱仪的光谱分辨率为线光谱展宽的半宽的 1.22 倍。计算表明光谱仪的实际分辨率优于  $9\text{ nm}$ 。

### 4. 光谱响应

限于实验室条件,此项测量仅通过改变 CCD 积分时间对恒定光源进行试验,其结果基本能代表整个光谱仪的光谱响应。测量结果表明光谱响应具有很好的线性性。

### 5. 相对光谱响应

根据文献[5]的数据,把太阳作为光谱分布已知的辐射源,测出光谱仪的相对光谱响应测量结果与各参数作理论计算结果吻合较好,但短波区光谱响应偏低。

### 6. 外场实验

光谱仪在野外对几种不同颜色的色布作了实地测量。对同一目标的多次测量表明,数据的稳定性和重复性与实验室测量结果吻合较好;在光谱仪分辨率精度内,太阳辐射的几个大气吸收峰的波长位置,同文献给出的结果完全符合,图 8 给出红布光谱反射率测量曲线及信号光谱曲线。

## 六、结 语

利用 CCD 器件具有多元并行积分探测和高动态范围等特点,引入微处理器自动控制和多功能数据处理技术,在实时、快速、方便、野外使用等方面作了一些尝试,研制成功一台新颖的野外用 CCD 瞬态光谱仪。表 2 给出光谱仪主要性能参数。

本光谱仪具有对目标各光谱通道同时作瞬态测量的特点,因此,除了在遥感领域广泛应用以外,在其它领域,比如钢水温度及其光谱的实时成份分析、闪光灯一次点燃光谱强度测量、炮弹炸点的烟雾光谱分析等方面也具有广泛的应用,并适用于测量各种运动物体的光谱

表 2 光谱仪主要性能参数  
Table 2 Main characteristics of the spectroradiometer

性能	参数值	性 能		参 数 值
工作波长	0.4~1.1 μm	输出光谱点 Δ/D 量化位 体积(头部) 重量(头部) 电源 功耗		.140
视 场	0.3°			8 Bit 10 次测量平均
灵敏度	0.1 (μJ/cm <sup>2</sup> )/V			150 × 250 × 350 mm <sup>3</sup>
动态范围	10 <sup>3</sup>			4 kg
光谱分辨率	3 nm			5 V ± 15 V (DC) 或 220V (AC)
波长定位精度	±1.5 nm			< 25 W (AC)
测量重复性	0.8%			TP 801 打印机
积分时间	$\frac{1}{50} \sim \frac{25}{50}$ sec	输出方式	1	XY 800 绘图仪
总测量时间	3 sec		2	磁带机
			3	

\* 未作实测,系根据 CCD 参数 0.75 μm 处响应计算结果

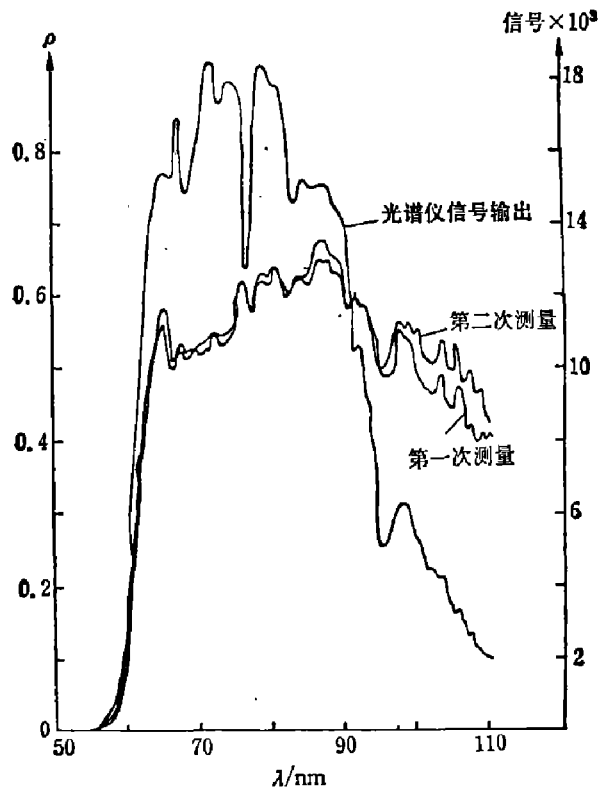


图 8 红外光谱反射曲线和信号光谱曲线

Fig. 8 Infrared reflectance spectra and signal spectrum



致谢——本文是在丁世昌、王铁铭导师精心指导下完成的,陈宝树老师担任了光谱仪头部机械设计工作,工作中还曾得到徐寅豪、杨跃明同志的具体帮助;在此一并致谢。

### 参 考 文 献

- [1] Chin Y. H., *Photo. Eng. & Ren. Sems.* **44**(1980), 4:507.
- [2] Jalni Y. H., *Siper H. P., Appl. Opt.* **19**(1980), 9: 1401.
- [3] Savitzky A., Colay M. J. E., *Anal. Chem.* **36**(1964), 8:1627.
- [4] Steiner J. Termonia Y., *Anal. Chem.* **44**(1972), 11:1906.
- [5] Selby, E. A. et al. , 1976 *Atmospheric Transmittance from 0.25 to 28.5 $\mu$ m: Supplement Ioutran 3B*(1976), AFGL-IR-76-0258.

## DEVELOPMENT OF CCD TRANSIENT SPECTRORA DIOMETER

CHEN MAI

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

### ABSTRACT

A stationary CCD transient spectroradiometer for field measurement operating in the spectral range of 0.4~1.5  $\mu$ m is developed. The working principle, the special features in design and the procedures to perform a surveying and signal processing with a microprocessor are described. The best choice of weighting factor for differentiation and smoothing of data by simplified least square procedure are discussed. The spectral radiance calibration, the error analysis, and the test in laboratory as well as some examples of field measuring results are also given.