

# 阿达玛变换调制光谱术\*

张 复 礼

(南开大学物理系)

**摘要**——本文描述了用自行研制的单编码和双编码阿达玛变换光谱仪(HTS)获得的红外和可见光谱。实验结果说明,对于红外光谱测量,HTS可以获得较大的信噪比增益,特别适用于弱红外信号的测量。对于可见光谱测量,假如出现的几个信号之间的强度相差不大,HTS也可能改善其信噪比。

HTS对稳定性和仪器加工精度的要求较低。在HTS中,当丢失数据点时,仍可用线性内插法获得光谱的主要特征,故有利于室外操作。

## 一、前 言

自从1951年 Fellgett<sup>[1]</sup>指出了多路调制技术的优点以来,至今已发展了两类多路调制光谱仪:第一类是使用干涉技术的傅里叶变换光谱仪(FTS);第二类是使用编码模板的(例如阿达玛变换)光谱仪(HTS)。HTS是近十几年中发展起来的一种新型光谱仪,应用日益广泛<sup>[2]</sup>。国内已进行了可见波段的单编码HTS原理性实验<sup>[3]</sup>。

## 二、工 作 原 理

HTS用模板代替常规光谱仪中的狭缝,采用阿达玛矩阵 $H$ 或由其导出的 $S$ 矩阵,对各光谱成份进行一次或两次编码和组合;测量每一组的总强度,利用计算机将探测器输出数据解码,从而求出光谱。它具有多路调制和高输入量的优点,提高了光利用率,增强了探测器接收的光信号。

1. 单编码调制 设有 $N$ 个光谱成分,使用 $N$ 个模板依次代替出射狭缝进行 $N$ 次测量,每个模板上有 $N$ 条缝,缝的透过(+1)、不透过(0)或反射(-1)性质由模板矩阵决定。通过第 $i$ 次模板第 $j$ 条缝的辐射能量记为 $\psi_j$ ,每次测量值为 $\eta_i$ ,噪声为 $\epsilon_i$ 。如果诸噪声是相互独立的随机变量,与信号强弱无关,且它们的预期值为零,均方差都为 $\sigma^2$ 时,理论证明与单色仪相比,阵元为1和-1的 $N$ 阶 $H_N$ 矩阵可使信噪比提高 $\sqrt{N}$ 倍;而阵元为0和1的 $N-1$ 阶 $S_n$ 矩阵( $n=N-1$ )可使信噪比提高约 $\sqrt{N}/2$ 倍( $N \gg 1$ 时)。一般采用循环 $S_n$ 矩

本文1982年5月13日收到。

\* 本文是作者的研究生毕业论文的一部分。作者现任天津大学精仪系教师。

阵, 这样可以用一块有  $(2n-1)$  条缝的模板代替  $n$  块模板, 每次步进一缝, 即变为矩阵的下一行编码。经解码算出的光谱强度估算值矩阵为:

$$\hat{\psi} = S_n^{-1} \eta = \frac{2}{n+1} (2S_n^T - J_n) \eta,$$

式中  $J_n$  为阵元都为 1 的  $n$  阶方阵。

2. 双编码调制 此时, 前后狭缝分别代之以  $N$  阶和  $M$  阶  $S$  矩阵  $U = (u_{rt})_{N \times N}$  和  $V = (v_{pj})_{M \times M}$  编码的模板, 其中  $r, p$  分别代表前后模板的位置序数,  $i, j$  分别代表前后模板在某一位置时的缝序数。对前模板的每一位置, 将后模板步进  $M$  次, 共测得  $MN$  个数据点。按空间分布的光谱强度估算值矩阵为:

$$\hat{X} = U^{-1} \eta (V^{-1})^T = \frac{4}{(N+1)(M+1)} (2S_N^T - J_N) \eta_{NM} (2S_M^T - J_M),$$

式中  $\hat{X} = (\hat{x}_{ij})_{NM}$ ,  $\eta = (\eta_{rp})_{NM}$ 。  $\eta_{rp}$  为第  $r$  个前模板第  $p$  个后模板时的测量值,  $x_{ij}$  为进入第  $r$  个前模板的第  $i$  条缝并经第  $p$  个后模板的第  $j$  条缝射出的光谱强度, 亦即光源的第  $i$  条空间单元的第  $j$  个光谱成份的强度(故双编码 HTS 既可获得光谱信息又具有空间成象能力)。(  $j-i$  )值相同的  $x_{ij}$  为同一光谱成份。作光谱测量时, 入射至前模板的光束应较均匀, 这时可推出各谱元按空间平均的强度估算值为:

$$\hat{\psi}_K = \begin{cases} \frac{1}{M+N-K} \sum_{i=1}^{M+N-K} \hat{x}_{i, K+i-N}, & (M \leq K \leq M+N-1) \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{x}_{i, K+i-N}, & (N \leq K \leq M-1) \\ \frac{1}{K} \sum_{i=N-K+1}^N \hat{x}_{i, K+i-N}, & (1 \leq K \leq N-1) \end{cases}$$

式中谱元序数  $K = N + j - i$ 。理论证明, 用  $S$  矩阵双编码信噪比可比单色仪提高约  $\sqrt{MN}/4$  倍。

### 三、仪器设计

我们将一台埃伯特-法斯蒂型一米光栅光谱仪改装成双编码 HTS, 其光路如图 1 所示。

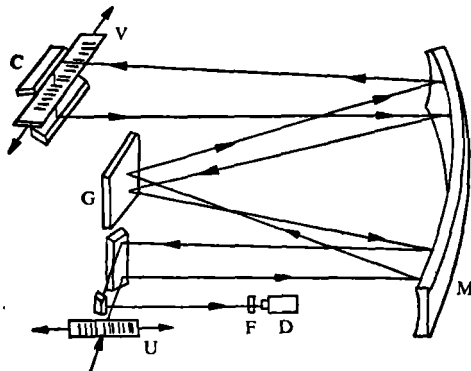


图 1 由埃伯特-法斯蒂型光谱仪改装的双编码 HTS 的光路

直角反射器  $C$  使光束沿原路返回, 消色散后, 会聚成如入射光束一样大小的光斑, 经滤光片  $F$  射至探测器  $D$ 。焦距为  $f=1050\text{mm}$  的凹面镜  $M$  兼作准直镜和成象物镜。每毫米 288 线的平面衍射光栅  $G$  的面积为  $50 \times 50\text{mm}^2$ 。探测器  $D$  置于凹面镜  $M$  的焦平面处。

前后模板  $U$  和  $V$  分别装在入射和出射焦平面处。编码选用  $M$  序列结构的  $S$  矩阵, 以便应用快速阿达玛变换解码。由于左循环  $S$  矩阵具有对称性  $S_{\xi}^T = S_{\xi}$ , 可简化很多计算, 故按左循环排列设计模板。利用循环的模 2 加法器, 由二进制本原多项式<sup>[4]</sup>导出编码如下:

利用循环的模 2 加法器, 由二进制本原多项式<sup>[4]</sup>导出编码如下:

15 阶前模板的第一个位置是: 10001 00110 10111。

255 阶后模板的第一个位置是: 00010 00000 01011 00011 11010 00011 11111  
 10010 00010 10011 11101 01010 11100 00011 00010 10110 01100 10111  
 11101 11100 11011 10111 00101 01001 01000 10010 11010 00110 01110  
 01111 00011 01100 00100 01011 10101 11101 10111 11000 11010 01101  
 01101 10101 00000 10011 10110 01001 00110 00000 11101 00100 01111。

以上编码“1”表示开缝，“0”表示闭缝。缝宽 0.2mm，允许误差为  $\pm 0.01$ mm。前后模板的光栏尺寸分别为  $3 \times 2.5 \text{mm}^2$  和  $51 \times 2.5 \text{mm}^2$ 。前后模板的照片如图 2 所示。

探测器输出信号经过交流放大器放大，由数字电压表显示。数据由打印机记录，再输入计算机解码，打印出光谱图。

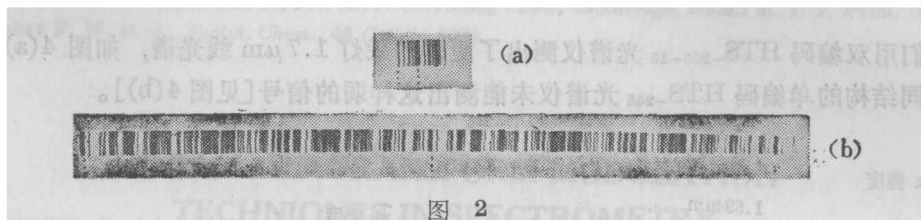


图 2 (a) 入射模板 (b) 出射模板

本仪器的分辨率主要由模板缝宽  $l$  决定。对于可见波段，分辨率约为  $3.3 \text{ \AA}$ ，对近红外，约为  $6.5 \text{ \AA}$ 。

将入射模板改为单狭缝，即改装成单编码 HTS。

#### 四、单编码 HTS 对红外光谱的测量

作者用单编码 HTS<sub>-255</sub> 光谱仪测量了汞灯  $1.36 \mu\text{m}$  线光谱，解码结果如图 3(a) 所示。其中采用了 PbS 探测器。电源电压为 20V。在探测器前面放置了红外滤光片。50Hz 交流供电的汞灯发出的光经透镜会聚射至入射狭缝。

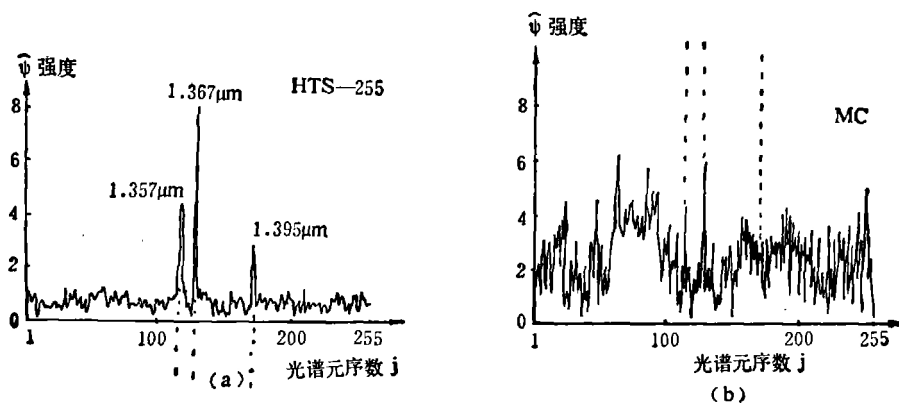


图 3 用同样的仪器测得的汞灯  $1.36 \mu\text{m}$  线光谱

(a) 按 HTS<sub>-255</sub> 操作 (b) 按常规单色仪操作

在相同条件下,用结构相同的单色仪测量的结果如图 3(b)所示。

设随机噪声为高斯分布,由以上结果算出,均方根信噪比增益的实验值约为 8.286,接近理论计算值 8。

在实验中注意到,HTS 可降低对信号稳定性的要求,容易获得光谱的主要特征。这是因为在 HTS 中,每个谱元的信息被测量  $\frac{1}{2}(n+1)$  次,编码阶数  $n$  越大,越有利于抗干扰。另外,又注意到,当因外界干扰而丢失少量数据点时,仍可以通过适当的处理(如线性内插法)获得光谱的主要特征。

## 五、双编码 HTS 对红外和可见光谱的测量

我们用双编码 HTS<sub>-255-15</sub> 光谱仪测出了更弱的汞灯 1.7 μm 线光谱,如图 4(a)所示。而用相同结构的单编码 HTS<sub>-255</sub> 光谱仪未能测出这样弱的信号[见图 4(b)]。

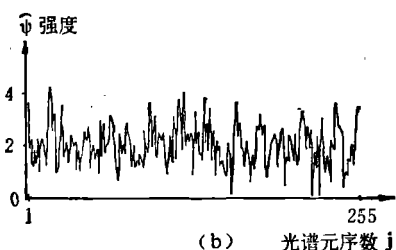
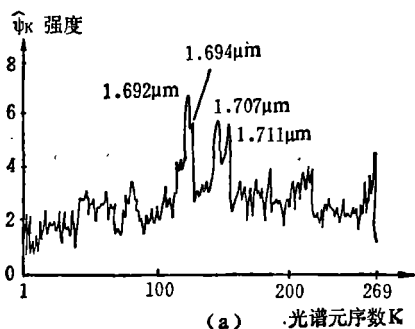


图 4 用同样的仪器测得的汞灯 1.7 μm 线光谱

- (a) 按双编码 HTS<sub>-255-15</sub> 操作  
(b) 按单编码 HTS<sub>-255</sub> 操作

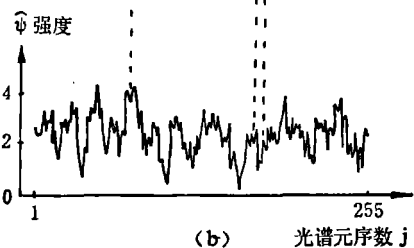
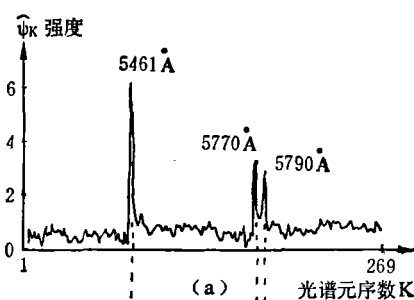


图 5

- (a) 用双编码 HTS<sub>-255-15</sub> 获得的汞灯绿线和黄线漫射光谱  
(b) 同样条件下,用单编码 HTS<sub>-255</sub> 获得的光谱

我们还用 HTS<sub>-255-15</sub> 光谱仪测量了可见波段的漫射光。在入射模板前 2.5 m 处置一白色泡沫塑料板,汞灯发出的光被其漫反射,不经聚光镜而直接射入 HTS。用频率为 1 KHz 的扇形斩波器对入射光波进行调制。采用了 GDB-23 型光电倍增管作为探测器,电源电压为 800 V。测算结果见图 5(a)。在相同条件下用单编码 HTS<sub>-255</sub> 光谱仪测量,结果如图 5(b)。当使用 500 Hz 斩波(可提高灵敏度)时,我们用双编码 HTS<sub>-255-15</sub> 光谱仪还探测到相距三米多的室内墙壁的漫射光信号。可见双编码调制更充分地发挥了多路调制和高输入量的优点,进一步提高了信噪比。

应该指出, HTS 对可见和紫外光谱测量有一定的局限性<sup>[5]</sup>。实验表明, 若出现的几个信号之间强度相差不大, 也可能改善信噪比。

致谢——本文是在导师沈寿春教授的精心指导下完成的。在实验准备过程中曾得到张炳泉老师的具体指教和帮助, 在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] Fellgett P., *J. Phys., Colloque C2*, **28** (1967), 165.
- [2] Harwit M. & Sloane N. J. A., *Hadamard Transform Optics*, Academic Prese, 1979.
- [3] 张炳泉等, 北京光学, 1 (1980), 2.
- [4] Peterson W. W. & Weldon E. J., Jr., *Error-Correcting Codes*, Cambridge, Mass.: M. I. T. Press, 1972.
- [5] Plankey F. W. et al., *Analyt. Chem.*, **46** (1974), 1000.

## HADAMARD TRANSFORM MODULATION TECHNIQUES IN SPECTROMETRY

ZHANG FULI

(Department of Physics, Nankai University)

### ABSTRACT

This paper describes infrared and visible spectra obtained with singly and doubly encoded Hadamard transform spectrometers (HTS) developed by ourselves. The experimental results show that HTS has greater S/N gain for infrared spectrometry, so it is especially suitable for measuring weak infrared signals; as for visible spectrometry, if the intensity difference among the signals is not great, HTS may also have better performance of S/N.

The stability and machining precision requirements for HTS are lower. When some data points are missing in HTS, the main spectral feature can be obtained by means of the linear interpolation. Therefore, HTS is advantageous for outdoor operation.