

阿达玛变换成像光谱术的研究

吴继宗 韩一平 邓家诚 张复礼 陈本智
(天津大学精密仪器工程系)

提 要

本文论述了阿达玛变换成像光谱仪的基本原理,探讨了工作模式和若干设计问题,利用自行研制的实验装置,在可见波段获得了各种透明字形的成像光谱图。采用对称 π 变换和快速 δ 阿达玛变换,改善了实验数据的处理方法。

关键词: 阿达玛变换成像光谱仪; 模板结构; 循环 δ 矩阵; 快速阿达玛变换。

一、引 言

阿达玛变换成像光谱仪(Hadamard Transform Imaging Spectrometer——HTIS)是一种新型的调制光谱仪器^[1],它具有测量信噪比高的优点,可同时对被测物体进行成像分析和光谱成份分析。

我们在国内首次研制出测量过程自动化的阿达玛变换成像光谱实验装置,并在可见波段进行了原理实验,取得了预想的结果。

二、成像光谱仪基本原理

HTIS是在双编码阿达玛变换光谱仪(Hadamard Transform Spectrometer——HTS)^[2]的基础上,将构成一维入射模板的矩阵折叠构成二维模板实现的。双编码HTS的理论也适用于HTIS,HTIS可以给出被测物体每一点的光谱成份或每一光谱成份的单色像。

1. 解码方程

若被测物体被分割成 n 个像元,光谱面被分割成 m 条窄带,要解出全部被测参量,需要 n 个不同的入射模板结构和 m 个不同的出射模板结构,进行 $n \cdot m$ 次测量方可。

设 $v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im}$ 为第 i 个入射模板结构, $w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jm}$ 为第 j 个出射模板结构,则相应的探测器读数为:

$$\eta_{ij} = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^m v_{ir} \psi_{rs} w_{js} + e_{ij}, \quad (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m), \quad (1)$$

式中, ψ_{rs} 是被测物体第 r 个空间元素的第 s 个光谱成份, e_{ij} 是该次测量的误差。

令 $\eta = (\eta_{ij})$ 为包含 $n \cdot m$ 个测量值的 $n \times m$ 阶矩阵, $\psi = (\psi_{rs})$ 为包含 $n \cdot m$ 个空间元素和光谱成份未知参量的 $n \times m$ 阶矩阵, $e = (e_{ij})$ 为 $n \times m$ 阶误差矩阵, $V = (v_{ij})$ 为描述入射模板

结构的 $n \times n$ 阶矩阵, $W = (w_{ij})$ 为描述出射模板结构的 $m \times m$ 阶矩阵, 则(1)式可以用矩阵的形式表示为:

$$\eta = V\Psi W^T + e_0 \quad (2)$$

2. 二维成像模板的构造

一维模板能否折叠成二维模板, 取决于编码矩阵阶数 n 的性质, 若 n 为一素数, 则入射一维模板便无法折叠成二维模板。

设 $n=15$, 循环 15 阶 S 矩阵为:

$$S_{15} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

S_{15} 有 15 种模板结构, 因为 $15=3 \times 5=5 \times 3=1 \times 15$, 所以, 矩阵的每一行都可以折叠成一个 3×5 阶或 5×3 阶或 1×15 阶矩阵。而 1×15 阶矩阵便是一维模板时的情形。由矩阵的第一行折叠而成的三种模板结构如图 1 所示。

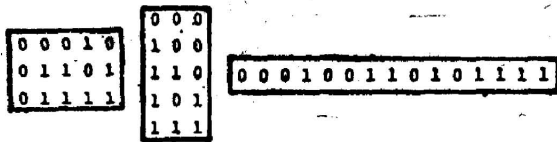


Fig. 1 Three ways of folding the first row of S_{15}

不管哪一种折叠方式, 探测器接收的信号是相同的, 即:

$$\eta_1 = \psi_4 + \psi_7 + \psi_8 + \psi_{10} + \psi_{12} + \psi_{13} + \psi_{14} + \psi_{15} + e_{10} \quad (3)$$

另外 14 种模板结构可分别由矩阵的第二, 第三, ..., 第十五行折叠而成。

对于循环 S 矩阵, 二维入射模板有两种不同的制造方法, 与之对应有两种不同的模板移动方式。

(1) 一维移动方式: 模板向同一方向依次步进 15 步, 见图 2;

(2) 二维移动方式: 模板横向移动 5 步(对应 3×5 阶折叠方式), 然后退回到原位, 向上移动一步, 再横向移动 5 步, 依次类推, 见图 3。

一般而言, 若一块 n 个元素的一维模板被折叠成 $n_1 \times n_2$ 式的二维模板($n=n_1 \times n_2$, n_1 为行数, n_2 为列数), 则方法 1 需要一块尺寸为 $n_1 \times (n+n_2-1)$ 的大模板, 阵元总数为

$$n_1(n+n_2-1) = (n_1+1)(n-1) + 1;$$

方法 2 需要一尺寸为 $(2n_1-1) \times (2n_2-1)$ 的大模板, 阵元总数为

$$(2n_1-1)(2n_2-1) = 4n - 2(n_1+n_2) + 1.$$

一维移动方式与二维移动方式相比, 前者机械结构简单, 但模板的阵元总数多, 在某些应用场合下会增加模板制做的困难, 因此, 采用何种移动方式, 需视具体情况而定。我们目前的实验对象为可见及近红外区, 模板由玻璃干板制做, 因此采用的是一维移动方式。

3. 成像光谱分析

当 HTIS 的入射模板为 $n=n_1 \times n_2$ 阶, 出射模板为 m 阶时, 通过对未知参数矩阵的分析可知, 用 HTIS 可以一次测得 n 个像点的 $m+n_2-1$ 个光谱成份, 而完整的单色像仅为 $m-n_2+1$ 幅, 其它 n_2-1 幅均由两种波长组合而成。

设

$$\Psi = (\psi_{ij}) = \begin{pmatrix} \psi_{11} & \psi_{12} & \dots & \psi_{1m} \\ \psi_{21} & \psi_{22} & \dots & \\ \dots & \dots & \dots & \\ \psi_{n1} & \psi_{n2} & \dots & \psi_{nm} \end{pmatrix} \quad (4)$$

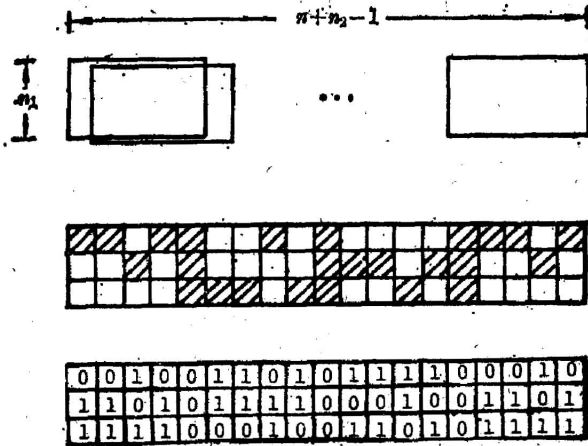


Fig. 2 One dimensional moving mode of mask

0	0	1	0	0	1	1	0	1	
1	1	0	1	0	1	1	1	1	
1	1	1	1	0	0	0	1	0	
0	0	1	0	0	1	1	0	1	
1	1	0	1	0	1	1	1	1	

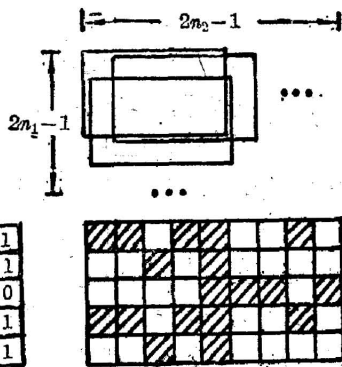


Fig. 3 Two dimensional moving mode of mask

考虑到 HTIS 的入射模板为二维模板, 其每一列都有 n_1 个元素组成,

令
$$i = l + kn_2 \quad (0 \leq k \leq n_1 - 1),$$

则有:
$$\psi_{ij} = \psi_{i, j-(l-kn_2)} = \psi_{i, j-l}, \quad (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m, 1 \leq l \leq n_2).$$

即:

由入射模板的每一列与出射模板每一狭缝间的对应关系可知, 从入射模板第 l 列进入, 出射模板第 j 条狭缝射出的光谱成份与从入射模板的第 $(l+t)$ 列进入, 出射模板的第 $(j+t)$ 条狭缝射出的光谱成份是相同的。如果用 ψ_{ij} 来表示由入射模板的第 l 列进入, 出射模板的第 j 条狭缝射出的被测信号, 则差值 $j-l$ 相同的 ψ_{ij} 为同一光谱成份。因此, 我们可以将 ψ_{ij} 改写成 $\psi_{i, j-l} (1 \leq l \leq n_2, 1 \leq j \leq m)$ 。

$$\Psi = (\psi_{ij}) = (\psi_{i,j-i}) = \begin{pmatrix} \psi_{1,0} & \psi_{1,1} & \cdots & \psi_{1,m-1} \\ \psi_{2,-1} & \psi_{2,0} & \cdots & \psi_{2,m-2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \psi_{n_2, -(n_2-1)} & \psi_{n_2, -(n_2-2)} & \cdots & \psi_{n_2, m-n_2} \\ \psi_{n_2+1, 0} & \psi_{n_2+1, 1} & \cdots & \psi_{n_2+1, m-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \psi_{kn_2, -(n_2-1)} & \psi_{kn_2, -(n_2-2)} & \cdots & \psi_{kn_2, m-n_2} \\ \psi_{kn_2+1, 0} & \psi_{kn_2+1, 1} & \cdots & \psi_{kn_2+1, m-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \psi_{n_1n_2, -(n_2-1)} & \psi_{n_1n_2, -(n_2-2)} & \cdots & \psi_{n_1n_2, m-n_2} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

把波长下标相同的阵元取出并按 $n_1 \times n_2$ 矩阵形式排列起来, 便构成一幅单色图像。如取出 λ_j 的所有阵元 $\psi_j = (\psi_{1,j}, \psi_{2,j}, \dots, \psi_{n_1,j})$, 其二维图像的数据排列方式为:

$$\begin{pmatrix} \psi_{1,j} & \psi_{2,j} & \cdots & \psi_{n_1,j} \\ \psi_{n_2+1,j} & \psi_{n_2+2,j} & \cdots & \psi_{2n_2,j} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \psi_{(n_1-1)n_2+1,j} & \cdots & \psi_{n_1,j} \end{pmatrix}.$$

其它波长处的单色像可用同样方法得到。如果我们把代表像元下标相同的全部元素取出, 便可以得到对应这一像元处的一条光谱曲线。

一幅完整的单色像应有 $n = n_1 \times n_2$ 个像元, (5) 式中只有代表波长的下标为 $0, 1, \dots, m - n_2$, 等 $m - n_2 + 1$ 个波长处有 n 个元素, 因此只能有 $m - n_2 + 1$ 幅完整的单色像, 而其它 $2n_2 - 2$ 个波长处的元素都不满 n 个, 不能构成完整的单色像。

三、仪器设计

我们目前研制的阿达玛变换成像光谱实验装置是由北京光学仪器厂生产的 WDG30 型单色仪改装而成的, 图 4 是其光路示意图, 图 5 是系统简图。景物通过成像物镜聚焦在色散光谱仪入射焦平面上的视场光阑处, 用循环 S 矩阵编码的二维模板沿着光阑扫描, 产生一包含所有空间分辨单元信息的随时间变化的信号, 然后入射的光信号经过色散系统色散, 在出射焦平面上形成光谱带, 用循环 S 矩阵编码的一维模板沿谱带放置, 每当入射模板完成一个扫描周期, 出射模板步进一个狭缝, 从而完成对光谱信息的调制。

经过出射模板后的信息, 由一直角反射镜转向, 沿原光路反回, 消色散聚焦到探测器上, 变化的光信号经探测器接收及其后的放大电路放大, 送入单板机进行 A/D 转换及一系列解码运算, 最后给出被测景物的空间及光谱信息。

1. 模板设计

入射、出射模板均按 63 阶循环 S 矩阵编码, 其第一个位置的编码为 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 1 0 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1 1 0 1 0 0 0 1 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 1 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 0。二维入射模板按 9×7 方式折叠, 像元尺寸为 $0.2 \times 0.2 \text{ mm}^2$, 入射光阑尺寸为 $1.8 \times 1.4 \text{ mm}^2$, 出射模板狭缝宽 0.2 mm , 出射光阑为 $1.8 \times$

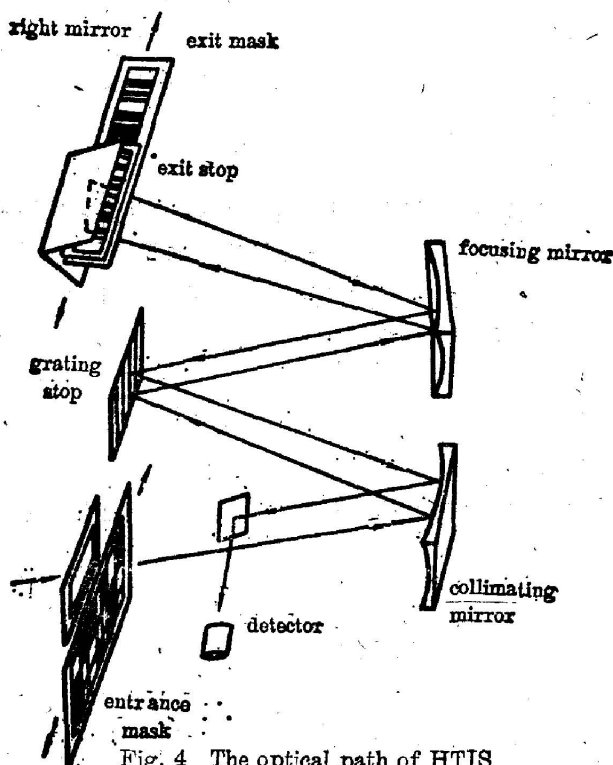


Fig. 4 The optical path of HTIS

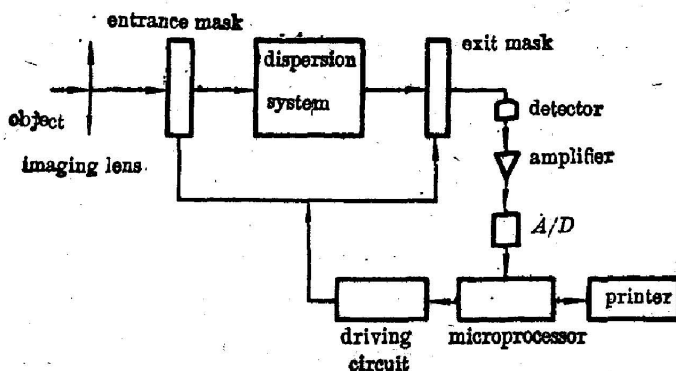


Fig. 5 The schematic diagram of experimental set-up of HTIS

12.6 mm²。模板是在固定图形式图形发生器上用玻璃干板制做的,见图 6。

2. 模板驱动机构

选用千分尺上的丝杆做为导向丝杆,丝杆螺距 0.5 mm,模板安装在导向螺母上,为了防止模板在移动过程中的晃动,设计了滑动导轨式定向机构。驱动电机选用

北京微电机厂生产的 SB-2B 型步进电机,分别由单板机的输入、输出接口 A 和 B 来控制,运转速度为 500 step/sec。

3. 信号接收

光信号进入探测器前经斩波器斩波,其调制频率为 500 Hz,从探测器出来的信号经前

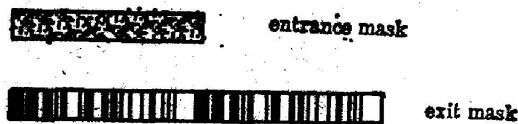


Fig. 6 Masks

置放大,直流放大,最后是信号保持和采集。入射模板每步进一步,单板机便给出一个采样信号,将放大的电压信号采入 A/D 转换器中。A/D 转换器为 8 路 8 位,最大输入电压 5V,电压分辨率 0.02 V。

4. 数据处理

数据处理亦由单板机完成(需进行存储器扩展)。解码运算采用快速阿达玛变换 (Fast Hadamard Transform——FHT),并用对称 π 变换进行向量变换,节省了大量计算机内存,提高了解码速度。解码运算仅需几秒钟。最后计算结果(包括数据、图形和光谱曲线)可由打印机打出,图像像素按强度值大小分为若干强度梯度。

5. 仪器基本参数

WDG30 单色仪的焦距为 300mm,相对孔径为 F/5.3,分辨率 $\leq 1\text{\AA}$,在使用 1200 lines/mm 光栅时,线色散为 $27\text{\AA}/\text{mm}$,使用 600 lines/mm 光栅时,线色散为 $54\text{\AA}/\text{mm}$,模板狭缝为 0.2mm,则光谱分辨率分别为 $27\text{\AA}/\text{mm}$ 和 $54\text{\AA}/\text{mm}$ 。模板的图像分辨率为 5 lines/mm。

四、实 验

我们主要对可见波段发射光谱进行了成像光谱测量,光源为与单色仪配套的低压汞灯,以各种不同的字形做为被测物体。汞灯经过毛玻璃照射在被测物体上,由成像物镜将被照明物体成像在入射光阑上,探测器为 GDB-20 光电倍增管,电压 900V。图 7 为汞灯绿线 5461\AA 和黄线 5770\AA , 5790\AA 的成像光谱图(由微处理机低分辨率屏幕显示的结果)。该图左侧为被测图形中心一点处的光谱分布曲线,右侧为与曲线峰值点处对应的几幅单色波长的像。强度分为 8 个灰度梯度。从图中可以看出,成像光谱仪不仅可以给出被测物体每一点处的光谱强度分布,而且还可以给出对应某一波长的单色图像各个点处的强度分布,共获得四维信息:波长、强度和 X、Y 座标。

在测量过程中我们发现模板的位相误差对测量质量有一定的影响,我们探讨和运用精细采样, δ 解码和快速 δ 阿达玛变换,使成像光谱图的质量得到了改善。

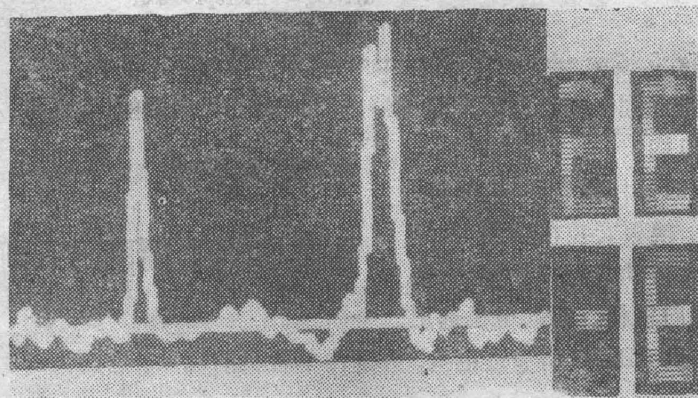


Fig. 7 At the left is the spectrum of radiation emanating from the center of the object which is illuminated by mercury vapor lamp. The right images show the scene at the green line and yellow lines

参 考 文 献

- [1] B. D. Swift *et al.*; *Appl. Opt.*, 1976, 15, No. 6 (Jun), 1595~1609.
[2] 张复礼;《红外研究》, 1982, 1, No. 4 (Dec), 301~305.

Study of Hadamard Transform Imaging Spectrometry

WU JIZONG, HAN YIPING, DENG JIACHENG, ZHANG FULLI AND CHEN BENZHI
(Department of Precision Instruments Engineering, Tianjin University)

(Received 13 June 1986)

Abstract

The principle of Hadamard Transform Imaging Spectrometer (HTIS) is described in this paper. The working mode and some design problems of HTIS are discussed. A number of experimental results are attained in the visible band by a self-made HTIS experimental set-up controlled by a microprocessor. Using the symmetric Transform and Fast Delta Hadamard Transform, the method of data processing is improved.

Key Words: Hadamard transform imaging spectrometer; Mask configuration; Cyclic S -matrix; Fast Hadamard transform.