第12卷 第7期
1992年7月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 12, No. 7
July, 1992

液晶空间光调制器在阿达玛变换光谱仪中的应用研究——快速精确的解码方法

张炳泉 毕凤飞

(苏州大学激光研究室, 苏州 215006)

提 要

研究了液晶空间光调制器(LC-SLM)作为固定不动的编码模板应用于阿达玛变换光谱仪(HTS), 提出了快速精确的解码方法, 给出了由液晶空间光调制器编码模板所带来的均方根信噪比的改善.

关键词 液晶空间光调制器, 编码模板, 阿达玛变换光谱仪, 解码方法.

1 引 言

阿达玛变换光谱仪(HTS)是在60年代末发展起来的, 它是一种与傅里叶变换光谱仪平行的多路传输的调制光谱仪, Harwit, Decker, Sloane 等人在这方面做了大量的工作[1~6]. 它是在传统的光谱仪中, 用编码模板代替入射狭缝或出射狭缝. 通常用机械模板作为阿达玛变换光谱仪的编码模板, 由于机械模板不仅扫描速度慢, 而且还存在较大的机械误差, 限制了其在分子光谱分析领域中的应用. 为此, Tilotta 等人[7]在 1987 年首先用液晶空间光调制器(LC-SLM)作为编码模板, 并设计了编码模板固定不动的阿达玛变换光谱仪, 它为未来的光谱分析提供了没有"移动部分"的光谱仪. 利用它对可见光谱、近红外光谱, 以及可见的喇曼光谱的测量取得了很大的成功[7,8]. 1989年, Bohlke 等人[9]又把它加以改装后用于近红外喇曼光谱的测量, 为近红外喇曼光谱的测量开辟了新的途径. 本文从误差理论出发, 提出了使用 LC-SLM 作为编码模板时的快速精确的解码方法, 并由此推出了均方根信噪比的改善与 LC-SLM 编码模板的开关特性的关系.

2 快速精确的解码方法

设编码单元数为 n, 有 n 个待测的光谱成分, 使用 n 个模板进行 n 次测量, 第 i 次测量的误差为 e_i, 假定[6]: (1) e_i 是不依赖于探测光强的随机变量; (2) e_i 的期望值为零; (3) 各次测量的误差是相互独立的; (4) e_i 的均方差为 σ^2. 则有

$$E\{e_i\}=0, \quad E\{e_i\cdot e_j\}=0, \quad E\{e_i^2\}=\sigma^2. \qquad i,\ j=1,\ 2,\ \cdots,\ n \quad i\neq j \tag{1}$$

式中 E 表示期望值或大量实验的平均值. 基于前面对误差所作的假设, 可以得到, 对于 n 次测量的误差 $e_1, e_2, \cdots, e_n$, 当 n 很大时, 有

收稿日期: 1991年3月14日; 收到修改稿日期: 1991年6月11日

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}e_i=0. \tag{2}$$

文献[7]表明，由 AND 公司的 Model 12 A 型的扭曲向列相的液晶显示组件改装而成的 LC-SLM 的开关特性在可见光谱区(350 nm～800 nm)的光谱响应是很平稳的．通光时的透射率的平均值为 32%，不透明时的透射率的平均值为 1.5%．文献[9]表明，PDLC(聚合物色散液晶)用作 LC-SLM 时，在近红外光谱区(10000 cm^{-1}～5500 cm^{-1})的开关特性也很平稳．通光时，透射率在 78%～81% 之间变化不透明时，透射率在 2%～11% 之间变化．根据上述事实，显然，可以在一段光谱区域里把 LC-SLM 的开关特性当作常数，不同光谱区域常数不同．

假定液晶模板编码单元通光时的透射率为 T_h，不透时的透射率为 T_0．模板编码单元的开和关按照 M 序列结构的左循环 S 矩阵 S_n 的每一行的阵元来进行．即对应的阵元为 1 时，模板的相应编码单元通光；对应的阵元为 0 时，模板的相应编码单元不透明．将 S_n 的阵元 1 变为 T_h，阵元 0 变为 T_0，可以得到模板的实际编码矩阵 S'_n，S'_n 可以表示为

$$S'_n=T_hS_n+T_0(J_n-S_n)=(T_h-T_0)S_n+T_0J_n, \tag{3}$$

式中 J_n 为阵元都为 1 的 n 阶方程，S 矩阵的性质和 M 序列结构的 S 矩阵的特性参见文献[6]．设加到模板的编码单元的能量用信号矢量 $\boldsymbol{\psi}$ 表示，$\boldsymbol{\psi}$ 就是待测的实际光谱成分强度值矢量，用 $\boldsymbol{\eta}$ 表示测量值矢量，则有

$$\boldsymbol{\eta}=S'_n\boldsymbol{\psi}+\boldsymbol{e}. \tag{4}$$

仍然按照 S_n 作为模板的编码矩阵时的解码方法进行解码，并利用式(3)、(4)得到实际光谱的估算值(初步) $\hat{\boldsymbol{\psi}}$ 为

$$\hat{\boldsymbol{\psi}}=S_n^{-1}\boldsymbol{\eta}=(T_h-T_0)\boldsymbol{\psi}+\frac{2T_0}{n+1}\begin{bmatrix}1\\ \vdots\\ 1\end{bmatrix}\sum_{i=1}^{n}\psi_i+S_n^{-1}\boldsymbol{e}, \tag{5}$$

对(5)式等号两边的矢量的个分量求和，可得到

$$\sum_{i=1}^{n}(\hat{\boldsymbol{\psi}})_i=\sum_{i=1}^{n}[(T_h-T_0)\boldsymbol{\psi}]_i+\sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{2T_0}{n+1}\begin{bmatrix}1\\ \vdots\\ 1\end{bmatrix}\sum_{j=1}^{n}\psi_j\right\}_i+\sum_{i=1}^{n}(S_n^{-1}\boldsymbol{e})_i. \tag{6}$$

对于(6)式各项计算，有

$$\left.\begin{aligned}
&\sum_{i=1}^{n}(\hat{\boldsymbol{\psi}})_i=\sum_{i=1}^{n}\hat{\psi}_i,\\
&\sum_{i=1}^{n}[(T_h-T_0)\psi]_i=(T_h-T_0)\sum_{i=1}^{n}\psi_i,\\
&\sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{2T_0}{n+1}\begin{bmatrix}1\\ \vdots\\ 1\end{bmatrix}\sum_{j=1}^{n}\psi_j\right\}_i=\frac{2T_0n}{n+1}\sum_{i=1}^{n}\psi_i,\\
\sum_{i=1}^{n}(S_n^{-1}\boldsymbol{e})_i&=\frac{2}{n+1}\sum_{i=1}^{n}[(2S_n-J_n)\boldsymbol{e}]_i=\frac{2}{n+1}\left[\sum_{i=1}^{n}(2S_n\boldsymbol{e})_i-\sum_{i=1}^{n}(J_n\boldsymbol{e})_i\right]\\
&=\frac{2n}{n+1}\cdot\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}e_i=0.
\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

将(7)式代入(6)式，有

$$\sum_{i=1}^{n}\psi_i=\frac{n+1}{(n+1)T_h+(n-1)T_0}\sum_{i=1}^{n}\hat{\psi}_i, \tag{8}$$

$$\hat{\boldsymbol{\psi}}=(T_h-T_0)\boldsymbol{\psi}+\frac{2T_0}{(n+1)T_h+(n-1)T_0}\begin{bmatrix}1\\ \vdots\\ 1\end{bmatrix}\sum_{i=1}^{n}\hat{\psi}_i+S_n^{-1}\boldsymbol{e}, \tag{9}$$

则

$$\frac{1}{T_h-T_0}\left(\hat{\boldsymbol{\psi}}-\frac{2T_0}{(n+1)T_h+(n-1)T_0}\begin{bmatrix}1\\ \vdots\\ 1\end{bmatrix}\sum_{i=1}^{n}\hat{\psi}_i\right)=\boldsymbol{\psi}+\frac{1}{T_h-T_0}S_n^{-1}\boldsymbol{e}. \tag{10}$$

设修正了的光谱估算值用 $\hat{\boldsymbol{\psi}}_{\mathrm{MODi}}$ 表示：令

$$\hat{\boldsymbol{\psi}}_{\mathrm{MODi}}=\frac{1}{T_h-T_0}\left(\hat{\boldsymbol{\psi}}-\frac{2T_0}{(n+1)T_h+(n-1)T_0}\begin{bmatrix}1\\ \vdots\\ 1\end{bmatrix}\sum_{i=1}^{n}\hat{\psi}_i\right), \tag{11}$$

则有

$$\hat{\boldsymbol{\psi}}_{\mathrm{MODi}}=\boldsymbol{\psi}+\frac{1}{T_h-T_0}S_n^{-1}\boldsymbol{e}. \tag{12}$$

这时的平均均方差 ε 为

$$\varepsilon=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_i=\left(\frac{1}{T_h-T_0}\right)^2\varepsilon_{\text{标准模板}}. \tag{13}$$

根据文献[6]，

$$\varepsilon=\varepsilon_i=\frac{4}{n}\left(\frac{1}{T_h-T_0}\right)^2\sigma^2. \tag{14}$$

均方根信噪比增益 $\Delta(SNR)_{\mathrm{r.m.s.}}$ 为

$$\Delta(SNR)_{\mathrm{r.m.s.}}=\left[\frac{E\{(\hat{\psi}_i-\psi_i)^2\}_{\text{没有多路传输}}}{E\{[(\hat{\psi}_{\mathrm{MODi}})_i-\psi_i]^2\}_{\text{有多路传输}}}\right]^{1/2}=\frac{\sqrt{n}}{2}(T_h-T_0). \tag{15}$$

如果假设 $T_h=1$, $T_0=0$, 则(12)式、(13)式以及(15)式给出的 $\hat{\boldsymbol{\psi}}_{\mathrm{MODi}}$、$\varepsilon$、$\varepsilon_i$ 和 $\Delta(SNR)_{\mathrm{r.m.s.}}$ 与编码矩阵 S_n 的标准编码模板所对应的 $\hat{\boldsymbol{\psi}}$、ε、ε_i 以及 $\Delta(SNR)_{\mathrm{r.m.s.}}$ 完全一样.

3 结　　语

1）使用 LC-SLM 作编码模板时，仍按照标准编码模板先对测量值矢量 $\boldsymbol{\eta}$ 进行快速阿达玛变换，得到光谱的估算值矢量(初步) $\hat{\boldsymbol{\psi}}=S_n^{-1}\boldsymbol{\eta}$, 具体算法参见文献[10]. 然后对估算值 $\hat{\boldsymbol{\psi}}$ 进行修正，由(11)式得到修正了的光谱估算值 $\hat{\boldsymbol{\psi}}_{\mathrm{MODi}}$, 此 $\hat{\boldsymbol{\psi}}_{\mathrm{MODi}}$ 即为实际光谱的最佳估算值.

2）根据我们给出的解码方法，我们可以推出 LC-SLM 作为 HTS 的编码模板时均方根信噪比增益 $\Delta(SNR)_{\mathrm{r.m.s.}}=(\sqrt{n}/2)(T_h-T_0)$, 可以看出，与标准编码模板相比，这时 $\Delta(SNR)_{\mathrm{r.m.s.}}$ 下降了.

3）利用(3)式和(11)式，作者进行了计算机模拟，证明所给出的解码方法是正确的.

参 考 文 献

[1] N. J. A. Sloane *et al.*, *Appl. Opt.*, 1969, **8** (10): 2103
[2] J. A. Decker *Jr. et al.*, *Appl. Opt.*, 1969, **8** (12): 2552
[3] P. G. Phillips, M. Harwit., *Appl. Opt.*, 1971, **10** (12): 2780
[4] M. Harwit, *Appl. Opt.*, 1971, **10** (8): 1415
[5] M. Harwit, *Appl. Opt.*, 1973, **12** (2): 285
[6] M. Harwit, N. J. A. Sloane, *Hahamard Transform Optics*. New York: Academic Press., **1979**
[7] D. C. Tilotta *et al.*, *Appl. Spectrosc.*, 1987, **41** (5): 727
[8] D. C. Tilotta *et al.*, *Appl. Spectrosc.*, 1987, **41** (8): 1280
[9] A. P. Bohlke *et al.*, *J. Mol. Structure* (*Thechem*), 1989, **200**: 471~481
[10] 张炳泉. 光学学报, 1984, **4** (3): 229

Study of liquid crystal spatial light modulator application in Hadamard transform spectrometer

ZHANG BINGQUAN　　BI FENGFEI
(*Laser Research Institute of Suzhou University, Suzhou* 215006)

(Received 14 March 1991; revised 11 June 1991)

Abstract

This paper presents a study of liquid crystal spatial modulator (LC-SLM) used as a stationary encoding mask of Hadamard transform spectrometer (HTS). A fast and accurate decoding method is proposed and the improvement is given in r. m. s. signal-to-noise ratio produced by LC-SLM encoding mask.

Key words LC-SLM, encoding mask, HTS, decoding method.