液晶空间光调制器在 HTS 中的应用研究*

——快速精确的解码方法

毕凤飞
(江苏悦达集团 技术中心,江苏 盐城　224002)

摘　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
中图分类号:O413　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-5322(2003)01-0035-03

阿达玛变换光谱仪(HTS)是在 20 世纪 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,Sloane、Harwit、Decker 等人在这方面做了大量的工作[1]。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,Tiloitta 等人在 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。1989 年,Bohlke 等人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。

1　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[1]:

(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

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

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

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

文献表明,由 AND 公司的 Model 12A 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%;PDLC(聚合物色散液晶)用作 LC-SLM 时,在近红外光谱区(10 000

* 收稿日期:2002-11-07
作者简介:毕凤飞(1965-),江苏淮安人,江苏悦达集团工程师,硕士。

$cm^{-1} \sim 5500\ cm^{-1}$)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,不透明时的透射率为 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,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

$$S'_n = TS_n + T_0(J_n - S_n) = (T - T_0)S_n + T_0 J_n \tag{3}$$

式中 Jn 为阵元都为 1 的 n 阶矩阵,S 矩阵的性质和 M 序列结构的 S 矩阵的特性参见文献。设加到模板的编码单元的能量用信号矢量 ψ 表示,ψ 就是待测的实际光谱成分强度值矢量,用 η 表示测量值矢量,则有

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

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)$\hat{\psi}$ 为

$$\hat{\psi} = S_n^{-1}\eta = (T - T_0)\psi + \frac{2T_o}{n+1}\begin{vmatrix} 1 \\ \cdots \\ 1 \end{vmatrix} \sum_{i=1}^{n}\psi_i + S_n^{-1}e \tag{5}$$

对(5)式等号两边的矢量的 n 个分量求和,可得到:

$$\sum_{i=1}^{n}(\hat{\psi})_i = \sum_{i=1}^{n}[(T - T_0)\psi]_i + \sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{2T_o}{n+1}\begin{vmatrix} 1 \\ \cdots \\ 1 \end{vmatrix}\sum_{j=1}^{n}\psi_j\right\}_i + \sum_{i=1}^{n}(S_n^{-1}e)_i \tag{6}$$

对于(6)式各项计算,有

$$\left.\begin{aligned} &\sum_{i=1}^{n}(\hat{\psi})_i = \sum_{i=1}^{n}\hat{\psi}_i \\ &\sum_{i=1}^{n}[(T - T_o)\psi]_i = (T - T_o)\sum_{i=1}^{n}\psi_i \\ &\sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{2T_o}{n+1}\begin{vmatrix} 1 \\ \cdots \\ 1 \end{vmatrix}\sum_{j=1}^{n}\psi_j\right\}_i = \frac{2nT_o}{n+1}\sum_{i=1}^{n}\psi_i \\ &\sum_{i=1}^{n}(S_n^{-1}\mathrm{e})_i = \frac{2}{n+1}\sum_{i=1}^{n}[(2S_n - J_n)\mathrm{e}]_i = \frac{2n}{n+1}\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\mathrm{e}_i = 0 \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

将(7)式代入(6)式,有

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

$$\hat{\psi} = (T - T_o)\psi + \frac{2T_o}{(n+1)T + (n-1)T_o}\begin{vmatrix} 1 \\ \cdots \\ 1 \end{vmatrix}\sum_{i=1}^{n}\hat{\psi}_i + S_n^{-1}\mathrm{e} \tag{9}$$

则:

$$\frac{1}{T - T_o}\left(\hat{\psi} - \frac{2T_o}{(n+1)T + (n-1)T_o}\begin{vmatrix} 1 \\ \cdots \\ 1 \end{vmatrix}\sum_{i=1}^{n}\hat{\psi}_i\right) = \psi + \frac{1}{T - T_o}S_n^{-1}\mathrm{e} \tag{10}$$

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

$$\hat{\psi}_{\mathrm{MODI}} = \frac{1}{T - T_o}\left(\hat{\psi} - \frac{2T_o}{(n+1)T + (n-1)T_o}\begin{vmatrix} 1 \\ \cdots \\ 1 \end{vmatrix}\sum_{i=1}^{n}\hat{\psi}_i\right) \tag{11}$$

则有

$$\hat{\psi}_{\mathrm{MODI}} = \psi + \frac{1}{T - T_o}S_n^{-1}\mathrm{e} \tag{12}$$

这时的平均均方差 ε 为
$$\varepsilon = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_i = \left(\frac{1}{T - T_o}\right)^2 \varepsilon_{\text{标准模板}} \tag{13}$$

根据文献[1] 有：
$$\varepsilon = \varepsilon_i = \frac{4}{n}\left(\frac{1}{T - T_o}\right)^2 \sigma^2 \tag{14}$$

均方根信噪比增益 $\Delta(\mathrm{SNR})_{r.m.s.}$ 为：
$$\Delta(\mathrm{SNR})_{r.m.s.} = \frac{\sqrt{n}}{2}(T - T_0) \tag{15}$$

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

2　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 η 进行快速阿达玛变换，得到光谱的估算值矢量(初步)$\hat{\psi} = S_n^{-1}\eta$。然后对估算值 $\hat{\psi}$ 进行修正，由(11)式得到修正了的光谱估算值 $\hat{\psi}_{\mathrm{MODI}}$，此 $\hat{\psi}_{\mathrm{MODI}}$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 $\Delta(\mathrm{SNR})_{r.m.s.} = \sqrt{n}/2(T - T_0)$，可以看出，与标准编码模板相比，这时 $\Delta(\mathrm{SNR})_{r.m.s.}$ 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] Harwit M，Sloane N J A. Hadamard Transform Optics[M]. New York：Academic Press，1979.

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

BI Feng-fei

(Technology Center of Jiangsu Yueda Group，Jiangsu Yancheng　224002，China)

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.

Keywords：LC－SLM；encoding mask；HTS；decoding method