

光学数据处理傅里叶变换分光光度计*

母国光 孔强 王肇圻

(南开大学现代光学研究所)

刘 华 光

(美国阿拉巴马大学)

提 要

本文提出了用光学处理器完成干涉图的傅里叶变换,从而实现全光学的傅里叶分光光度计的新技术。主要步骤是:1. 获得待测光源时域的干涉图信号;2. 利用电光调制技术实现干涉图信号的时-空转换;3. 用光学处理器完成空域干涉图信号的傅里叶变换,得到待测光源的光谱。

一、引 言

目前,傅里叶分光光度学方法已成为从近红外到远红外及至到毫米波区最有力的光谱学手段,并广泛地应用于科学研究、工业检测、空间开发和环境监测等方面^[1]。傅里叶分光光度计以其高分辨和高信噪比的优点使传统的色散型和光栅型光谱仪相形见绌。另一方面,傅里叶光学和光学频谱分析作为六十年代初兴起的一项新技术,迅速发展起来。1960年 Cutrona 等人提出多通道光学功率谱分析方法^[2]。1966年 Thomas 提出用密度调制信号片对大空间带宽积信号进行频谱分析^[3]。1975年 F. T. S. Yu 用光学频谱分析方法获得了语音信号的谱图^[4]。

本文提供了用光学处理器进行傅里叶变换的傅里叶分光光度计的技术。该技术由三部分构成:一、干涉图信号的产生装置;二、干涉图信号的时-空转换装置;三、空域干涉图信号片的光学傅里叶变换装置。作为实例本文给出了用该设计获得的分辨本领 $R > 1000$ 的低压汞灯和低压钠灯的光谱图。

二、主要设计及其原理

傅里叶分光光度法是通过双光束干涉仪产生的待测光源的干涉图信号作逆傅里叶变换来获得光源的光谱。我们拟用光学处理器代替计算机对干涉图进行傅里叶变换,该设计实质上是一个光-电“混合”系统。其主要设计如图1的框图所示。

1. 待测光源干涉图信号的产生

干涉图信号的产生装置如图2所示。反射镜 M_1 和 M_2 分别是迈克尔逊干涉仪的动镜

收稿日期:1985年12月4日;收到修改稿日期:1986年2月28日

* 中国科学院科学基金资助的课题。

作者母国光在美国阿拉巴马大学访问期间曾与刘华光教授讨论过本文的设想。

由起偏片 P_1 、电光晶体 KDP、 $\lambda/4$ 片和检偏片 P_2 共同构成横向电光调制器。将电压放大器 A 输出的干涉图电信号 $f(t)$ 加到 KDP 晶体上, 调制以光强 I_0 输入的激光, 得到电光调制器的输出为^[6]

$$I(t) = \frac{1}{2} I_0 \left[1 + \sin \frac{\pi}{V_\pi} D(v_0 t) \right], \quad (3)$$

其中 V_π 是电光调制器的半波电压。若 $\max |D(v_0 t)| \ll \frac{V_\pi}{\pi}$, 即信号电压峰值远小于调制器半波电压时, 我们有:

$$I(t) = \frac{1}{2} I_0 \left[1 - \frac{\pi}{V_\pi} D(v_0 t) \right], \quad (4)$$

即输出光强为干涉图电信号 $D(v_0 t)$ 所线性调制(图 4)。

由扩束器 L' 、柱透镜 L'' 、狭缝 F 、成像透镜 L''' 构成狭缝成像装置。被调制的激光束经扩束和会聚后照明狭缝 F 、 L''' 将狭缝 F 成像在记录底片 O 上。由伺服电机驱动底片, 使其以恒定速度 v_0 与迈克尔逊干涉仪同步扫描, 进行扫描曝光。控制 I_0 , 使曝光处于底片 $T-E$ 曲线的线性区。在合适的显影、定影条件下, 我们得到一维密度调制的空间信号片。由(4)式, 其振幅透过率为

$$f(x) = \left(a - \frac{1}{2} b I_0 \right) - \frac{\pi}{2V_\pi} b I_0 D(v_0 x / v_0), \quad (5)$$

其中 a 、 b 是与底片有关的常量。从而完成了干涉图信号由时域向空域的转换。根据实验条件选取 v_0/v_b 可得到适当空间频率范围的记录底片。

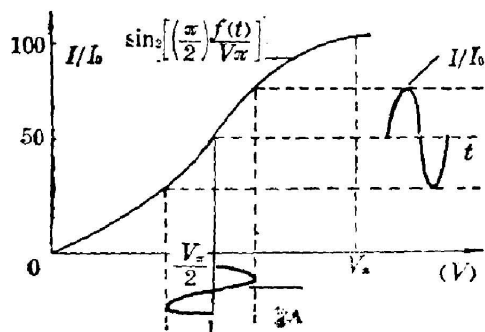


Fig. 4 The characteristic of electro-optic modulator

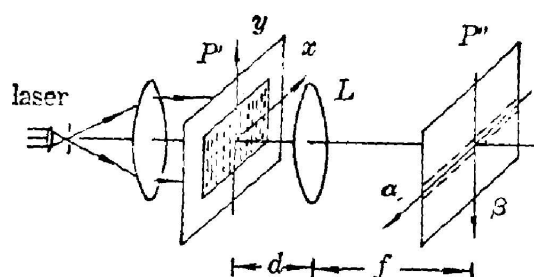


Fig. 5 A schematic of a coherent optical processor

3. 空间干涉图信号的逆傅里叶变换

将上面得到的空间干涉图信号片置于图 5 所示的相干光处理器的输入平面 P' 上, 并设在 P' 平面上的取样窗长度为 $2L$ 。当用准直光照明时 P' 平面后的复光场分布为

$$f'(x) = f(x) \cdot \text{rect}(x/L), \quad (6)$$

其中

$$\text{rect}(x/L) = \begin{cases} 1 & \text{当 } |x| \leq L, \\ 0 & \text{当 } |x| > L. \end{cases}$$

傅里叶变换透镜 L 对复光场分布 $f'(x)$ 作逆傅里叶变换, 于是在空间频率平面 P'' 上我们得到光信号输出:

$$F(p, q) = K \mathcal{F}^{-1}\{f(x)\} \otimes \mathcal{F}^{-1}\{\text{rect}(x/L)\} \delta(\eta), \quad (7)$$

其中 \otimes 表示卷积运算, (p, q) 表示空间频率。将(5)式代入(7)式,并略去常量因子,我们有

$$F(p, q) = B(v_s p/v_o) \otimes \sin c(Lp) \delta(\eta). \quad (8)$$

于是在相干光处理器的输出平面 P'' 上我们得到沿 p 轴分布的待测光源的光谱 $B(\sigma)$ 。将一光探测器置于 P'' 平面上,使其沿 p 轴扫描记录,即可得到以电信号输出的光谱图。

4. 光谱分辨率分析

影响光谱分辨率的因素主要是空间信号片的有限空间带宽积以及光源孔径对光谱线的展宽和频移。

设待测光源是频率为 σ_0 的单色光源 $\delta(\sigma - \sigma_0)$, 根据(8)式我们有

$$F(p, q) = \sin c[L(p - p_0)] \delta q, \quad (9)$$

其中 $p_0 = v_s \sigma_0 / v_o$ 是空间信号片的空间频率。根据瑞利判据,我们取 $\sin c$ 函数第一零点间的频率差作为可分辨的最小频率差,根据(9)式我们有

$$2L\Delta p = 1, \quad (10)$$

其中 $\Delta p = p - p_0$ 。因此系统的分辨本领

$$R = p_0 / \Delta p = 2Lp_0. \quad (11)$$

$2Lp_0$ 是光学处理器输入信号的空间带宽积。从(11)式我们看到提高记录底片的空间频率或加大取样窗的长度可以提高系统的分辨本领。

影响分辨率的第二个因素是图1中光源孔径 D 对光谱线的展宽 $\Delta\lambda_1$ 和频移 $\Delta\lambda_2$ ^[1]

$$\begin{cases} \Delta\lambda_1 = \lambda\Omega / 2\pi, \\ \Delta\lambda_2 = \lambda\Omega / 4\pi, \end{cases} \quad (12)$$

其中 Ω 为 D 对透镜 L_1 所张的立体角, λ 为入射光的波长。在我们的实验中,取光源孔径 D 为 1.0 mm, 透镜 L_1 的焦距为 240 mm, 因此和(11)式相比较, (12)式的影响可以忽略。

三、实验及其结果

虽然我们的分光光度计特别适合于红外波段的光谱分析,但作为实验演示,我们只对可见光源进行了光谱分析。实验中我们分别用低压汞灯和低压钠灯作为待测光源;用光电倍增管和锁相放大器作为时域干涉图信号的接收和放大器件;用消光比为 500:1, 半波电压为 500 V 的 KDP 晶体电光调制器作干涉图信号的时空转换器件;用极限分辨率为 200 pair lines/mm 的天津缩微 I 胶片作为空域干涉图信号的记录底片;为保证 $R > 1000$ 的分辨率,我们取空间信号片的最高空间频率为 $p = 30$ pair lines/mm, 光学处理器的输入窗长为 $2L = 45$ mm;用光电倍增管和 X-Y 记录仪作为光学处理器输出信号的探测和记录器件。

图6是由示波器显示的低压汞灯时域干涉图信号。图7是实验中记录到的空间干涉图信号片。图8是经平滑处理后的低压汞灯光谱图。光谱范围为 $3838 \text{ \AA} \sim 5979 \text{ \AA}$ 。从图中可以看到相对强度较强的四条谱线: 5790 \AA , 5461 \AA , 4358 \AA , 4047 \AA 。它们与汞灯的标准谱图相符。图9是经平滑处理后的低压钠灯光谱图。为验证分光光度计的实际光谱分辨率,我们只选取了钠双线 5890 \AA 和 5896 \AA 。分辨钠双线结构要求仪器的分辨本领为 $R = 1000$ 。在图9的光谱图中双线的凹陷处与较低峰处的强度比为 62.25%, 这说明仪器的分辨本领

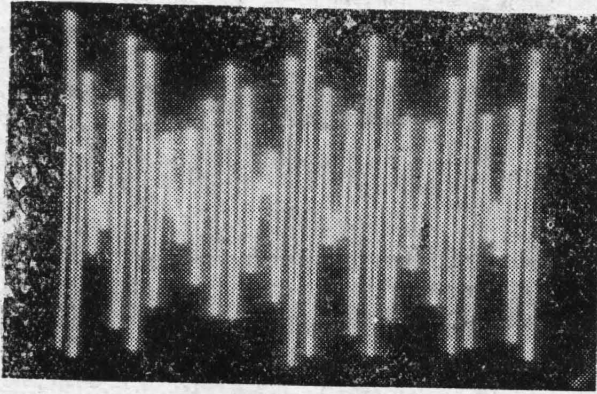


Fig. 6 The temporal signal of inte ferogram of low-pressure mercury arc

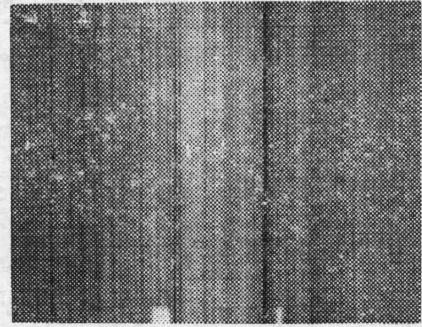


Fig. 7 The transparency of spacial interferogram

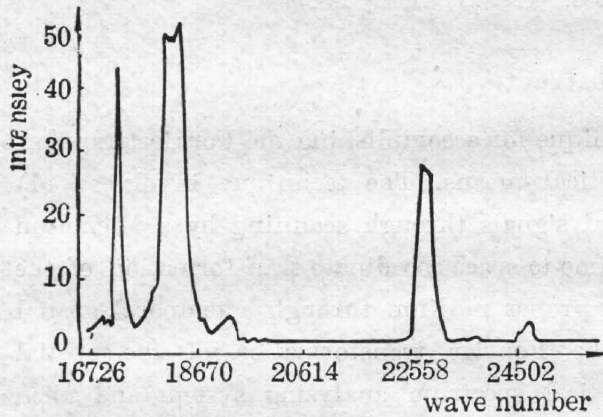


Fig. 8 The spectra of low-pressure mercury arc

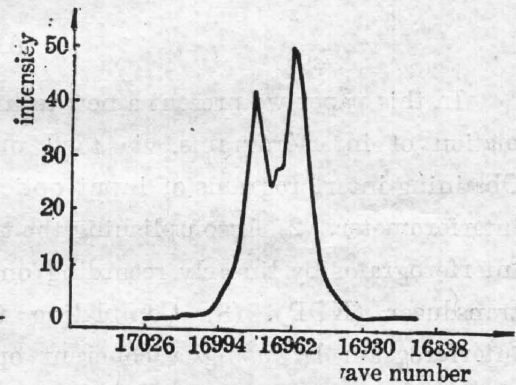


Fig. 9 The spectra of low-pressure sodium arc

$R > 1000$ 。

在图 8 和图 9 所示的两张谱图中, 谱线的相对强度有一定误差, 这是由于光电倍增管频响特性的影响造成的。

四、结 束 语

我们在本文中提出了一种利用光学处理器完成干涉图的逆傅里叶变换从而得到待测光源光谱的新技术。虽然我们的实验只对可见光源进行了光谱分析, 但该仪器特别适合于红外光谱分析。如果能以空间光调制器代替感光胶片来记录空域干涉图信号, 并以二维记录代替一维记录, 我们将得到一个实时化、高分辨的光谱仪, 这也许是一种新型傅里叶分光光度计诞生的基础。

参 考 文 献

- [1] R. J. Bell; *«Introductory Fourier Transform Spectroscopy»*, (Academic Press, New York, 1972), 10, 149.

- [2] L. J. Cutrona *et al.*; *IRE Transactions on Information Theory*, 1960, **IT-6**, No. 3 (Jun), 386.
[3] C. E. Thomas; *Appl. Opt.*, 1966, **5**, No. 11 (Nov), 1782.
[4] F. T. S. Yu; *IEEE Spectrum*, 1975, **12**, No. 2 (Feb), 51.
[5] E. Wolf; *«Progress in Optics»*, (North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1967), **6**, 280~283.
[6] A. Yariv; *«Introduction to Optical Electronics»*, (Holt, Rinehart and Winston, 1971), 257.

Optical data processed Fourier transform spectrometer

MU GUOFUANG, KONG QIANG AND WANG ZHAOQI
(*Institute of Modern Optics Nankai University, Tianjin*)

LIU HUAGUANG
(*Universit of Alabama, U.S.A.*)

(Received 4 December 1985; revised 28 February 1986)

Abstract

In this paper we present a new technique for accomplishing the Fourier transformation of interferograms via total optical means. The technique involves: (1) Obtaining interferograms of input optical signals through scanning by a Michelson interferometer. (2) Accomplishing the time-to-space coordinate transformation of the interferograms by linearly recording on proper medium through a temporal-spatial transducer (KDP). (3) Completing the Fourier transformation of the spatial interferogram by using a coherent optical spectrum analyzing system and then obtaining the spectrum of the input optical signal at the output plane of the system.