

光学/数字混合图像处理用于星体斑点干涉术的模拟实验

沈忙作 王伟建

(中国科学院光电技术研究所)

提 要

本文介绍一种光学/数字混合图像处理方法,它可用于星体斑点干涉术,以克服大气扰动的影响,使天文望远镜达到理论衍射极限。混合处理系统包括相干光傅里叶变换装置、光学输出数字化的显微密度计和微计算机三部分。在简单分析星体斑点干涉术数据处理的要求之后,本文将叙述系统各部分的组成和设计,介绍处理模拟星体图像的结果,讨论今后的发展和其它可能的应用。

从七十年代起,光学/数字混合图像处理技术引起了人们的注意,它能以比较经济的代价,取得满意的处理结果。这是因为混合处理既有光学处理的优点,即速度快,能进行傅里叶变换,滤波,相关,卷积等复杂的两维平行运算,设备简单便宜;同时又具有数字处理的长处,即运算精度高,程序灵活可变。所以在某些图像处理的应用中,采用光学处理和微型计算机数字处理相结合的方法,显得更为实用。

我们在实验室中用一个光学/数字混合图像处理系统,处理模拟天文望远镜拍摄的星体斑点干涉术(stellar speckle interferometry)的短曝光照片,克服了光路中随机相位起伏的影响,获得了具有光学衍射极限分辨率的信息。

一、星体斑点干涉术的基本原理和对数据处理的要求

为了使天文望远镜在天文摄影中可以达到光学衍射极限,1970年法国的 A. Labeyrie 首先提出了星体斑点干涉术的方法^[1]。这种方法采用像增强器和窄带滤光片,在很短的时间里曝光,记录下一系列星体目标的斑点干涉图,即所谓短曝光照片,然后再用图像处理的方法,从这些短曝光照片中提取目标的信息。因为星体像在短曝光照片中具有颗粒状的结构,每个颗粒的大小相当于望远镜衍射 Airy 斑的尺寸,包含有达到衍射极限分辨率的信息,所以最终处理的结果可以达到望远镜的光学衍射极限。图 1 是我们在实验室中模拟拍摄的照片。

第 n 张目标短曝光像 $i_n(x)$ 可以用目标函数 $O(x)$ 与大气及望远镜的系统点扩展函数 $t_n(x)$ 的卷积表示:

$$i_n(x) = O(x) \otimes t_n(x), \quad n=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中 x 为空间坐标。在频率域坐标 u 中, N 张短曝光像的平均功率谱为

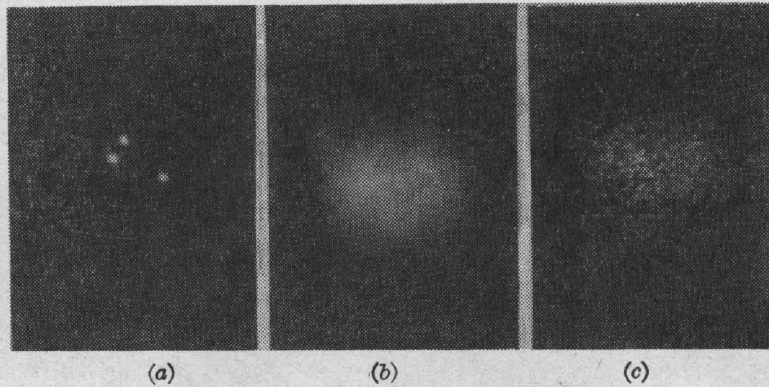


图1 三合星的实验室模拟照片

(a) 衍射极限像 (b) 长曝光像 (c) 短曝光像(斑点干涉图)

Fig. 1 Laboratory simulation images of triple stars:

(a) diffraction limited image (b) long exposure image (c) short exposure image.

$$\frac{1}{N} \sum |I_n(u)|^2 = |O(u)|^2 \cdot \frac{1}{N} \sum |T_n(u)|^2, \quad (2)$$

其中 I_n , O , T_n 分别表示 i_n , O , t_n 的傅里叶变换。(2) 式中的 $\frac{1}{N} \sum |T_n(u)|^2$ 称为斑点干涉术的传递函数, 它可以由测量一颗不可分辨的单星获得。从而可以求得目标本身的功率谱。

$$|O(u)|^2 = \sum |I_n(u)|^2 / \sum |T_n(u)|^2. \quad (3)$$

因为斑点干涉术传递函数 $(1/N) \sum |T_n(u)|^2$ 一直伸展到望远镜的衍射极限空间频率处, 所以求得的目标功率谱也具有相同的极限空间频率。这就是斑点干涉术能达到望远镜极限分辨的缘故。

根据自相关定理, 功率谱的逆傅里叶变换就是目标的自相关函数

$$F^{-1}\{|O(u)|^2\} = O(x) \star O(x), \quad (4)$$

式中 \star 为相关算符。一般情况下, 斑点干涉术给出目标的自相关函数, 由此可以提取目标的有用信息, 如单星的角直径, 双星的角距离。另外, 还有一些较为复杂的方法, 可以从目标的功率谱求出目标本身^[2, 3]。

根据以上分析, 星体斑点干涉术的数据处理应包括如下步骤:

- (1) 对许多张(可达数千张或更多)目标短曝光像进行傅里叶变换, 取其功率谱 $|I_n(u)|^2$;
- (2) 将所有功率谱叠加, 得 $\sum |I_n(u)|^2$, 用同样的方法计算 $\sum |T_n(u)|^2$;
- (3) 作除法, 求目标功率谱 $|O(u)|^2$, 必要时还需作噪音补偿;
- (4) 作逆傅里叶变换, 求目标自相关函数;
- (5) 最终目标信息的提取, 显示, 记录。

二、光学/数字混合处理系统

星体斑点干涉术最早的数据处理是用光学法^[4, 5]。之后, 又出现了用计算机处理的纯数字法^[6]。但从上一节的分析看出, 数据处理中的步骤 (1), (2) 两项需要对大量的短曝光像

进行二维傅里叶变换,平方,求和的冗长运算,这恰好是光学处理的特长。而步骤(3),(4),(5)诸项运算,只对一幅平均功率谱进行,计算量不大,但变化多,宜用计算机数字处理。图2是我们在实验室中所用混合处理系统的方块图。

1. 相干光傅里叶变换装置

用氦-氖激光器作光源, $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$ 。输入的短曝光像正片,用准直的相干平行光束照明。以标准 35 mm 电影胶片输入,对角线长 30 mm。在实验中,输入面上望远镜的衍射极限分辨率(即 Airy 斑半径)为 $\alpha=0.09 \text{ mm}$, 对应截止空间频率 $u_c=13.6 \text{ mm}^{-1}$ 。变换透镜焦距 $f=500 \text{ mm}$, 这时输出面上光斑直径为 $2u_c f \lambda=8.6 \text{ mm}$ 。用 1112 中速电影负片记录功率谱,动态范围可达 400 以上,相应的反差 $\gamma=0.65$ 。在拍摄功率谱之前,用同一个胶卷先拍摄若干张阶梯密度板的照片,用以校正底片的非线性效应。

图3是经光学处理得到的三合星目标像的功率谱。由于多次叠加的结果,平均功率谱的信噪比显著提高了。

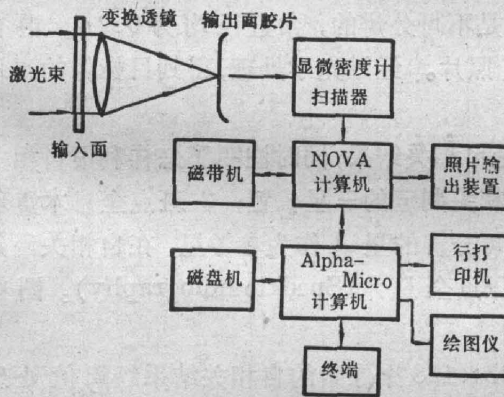


图2 混合处理系统方块图

Fig. 2 Block diagram of the hybrid processing system

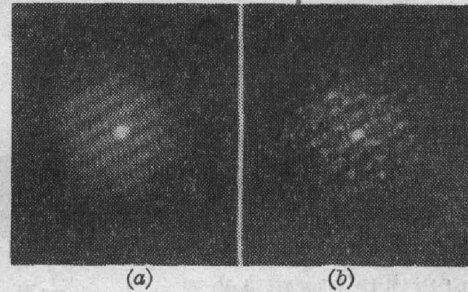


图 3

(a) 单张三合星短曝光像的功率谱
(b) 50 张短曝光像的平均功率谱

Fig. 3

(a) Power spectrum of single short exposure image of triple stars (b) average power spectrum of 50 short exposure images

2. 显微密度计

胶片记录的平均功率谱通过显微密度计扫描,转化成数字量,供下一步计算机数字处理。实验用的显微密度计包括一台胶片扫描装置,一台 NOVA 专用计算机,一台记录数据的磁带机,和一台图片输出装置。扫描孔径有 $25 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$ 四档可调。密度测量范围 $D=0\sim 3$, 共分 256 个等级。

扫描孔径的大小,采样单元的数目要兼顾最终输出自相关函数的空间采样间隔,空间复盖范围和计算机计算量三方面的要求。在我们的实验中,扫描孔径 $A=50 \mu\text{m}$, 采样单元数 $M^2=128 \times 128$, 这时输出自相关函数的采样间隔为

$$\Delta x' = \frac{f\lambda}{MA} = 0.049 \text{ mm} = 0.54 \alpha,$$

式中 $\alpha=0.09 \mu\text{m}$, 为衍射极限分辨率。自相关函数总的空间覆盖范围为 $M\Delta x'=69.7 \alpha$ 。考虑到自相关函数的对称性,实际对应的星体空间覆盖范围只有它的一半,即 34.8α 。

3. 计算机

进行数字计算的是一台 Alpha-Micro 微计算机。进行的运算有:数据格式的规格化,

胶片特性的非线性校正,求系统的传递函数和目标的功率谱,逆傅里叶变换求目标的自相关函数,最终信息的提取或图像的输出。处理后的输出有三种方式:(1)在行打印机上,用字符组成的阵列印出;(2)数据返回 NOVA 机,由照片输出装置印成照片;(3)用绘图仪画出图像的假三维立体图,图像的强度用高度值表示。

在所有的数字处理中,逆傅里叶变换所占的运算时间最长。这是因为内存容量不够,不足以存放 128×128 二维复数数组,因而变换时,内存要与外存(磁盘)交换数据。我们修改编制了一个快速傅里叶变换程序,在行变换之后,将存放在磁盘中的复数阵列作比较快的转置,然后再作列变换。这样,一次快速傅里叶变换的时间可以压缩到二十几分钟。总的处理时间,从功率谱照片在显微密度计上扫描到最终数据输出,约在 1 小时左右。

三、实验结果

原始目标是图 1(a) 所示的三合星,每颗星都是不可分辨的,角直径均为 0.2α 。混合处理的对象是一系列如图 1(c) 那样的模拟短曝光照片。经过光学处理,得到目标像的平均功率谱,如图 3(b) 所示。

为了比较起见,图 4 中画出了原始目标的理论自相关结果,同时注明了怎样利用自相关函数推算原始目标中三颗星的相对位置。1-自由相关判定的三星位置;2-斑点全息术重现的双星。此外,如果用在同一等晕区中的一颗不可分辨的星 A 作为参考星,在自相关函数中可以找到其余两颗星的重现像,这一方法叫做斑点全息术(Speckle holography)。图中标出了那两颗星重现像的位置。

数字处理得到的自相关结果见图 5。这是 128×128 个像素的自相关结果经阈值处理后的二元图像。因为行打印机的字距小于行距,所以它与图 4 所示的理论结果相比,显得有些畸变,实际上是一样的。图中清楚地显示出一个自相关中央极大值和六个互相关极值。围绕自相关中央极大值周围的某些孤立点是噪音。

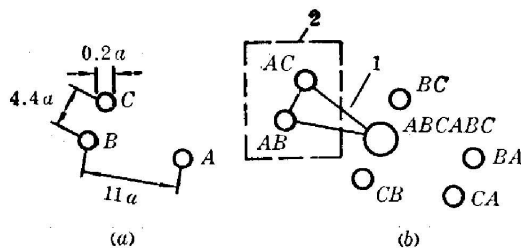


图 4 原始目标三合星(a),其理论自相关(b)的相对几何关系。

Fig. 4 Geometry of original object

(a), and its theoretically expected autocorrelation (b)

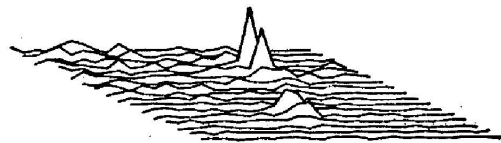


图 5 自相关结果的二元像

Fig. 5 Binary image of computed autocorrelation

图 6 是斑点全息术给出的双星像(它实际上是自相关结果的一部分),用绘图仪画出的假三维立体图。实际的自相关数值告诉我们,这两颗星的强度不等,大约是 1:2.6,这也可以从图 6 直观地看出。

最后,由图 5 和图 6 可见,每个峰值的半径约为 2 千采样间隔。如前所述,每个采样间隔的距离是 $\Delta x' = 0.54 a$, a 为光学衍射极限值,即 Airy 斑半径。这样,自相关输出的分辨率就是 $2\Delta x' = 1.08 a$,证明了用星体斑点干涉术处理后得到的信息分辨率已达到光学衍射分辨极限。

四、讨 论

我们的实验室模拟实验证明,用光学/数字混合方法进行星体斑点干涉术的数据处理是可行的,能够克服大气扰动的影响,达到望远镜的衍射极限分辨率。并且只要在计算机处理的程序上作相应的改动,这样的混合处理还可以根据目标功率谱的特点,实现图像分类与模式识别这样的功能。

在现在的系统中,目标的功率谱用胶片记录,胶片必须经过显影定影处理,再在显微密度计上转化为数字量。这样做对于多幅功率谱的叠加是必要的。此外,显微密度计的位置测量和密度测量精度较高,有利于高精度的处理。但若测量精度要求不那么高时,用电视摄像管探测光学输出,再经视频信号数字化器量化后送入计算机,整个系统就会更加快速有效,适合于多种用途的需要。这是混合处理系统今后准备扩展的内容。

虞乃君,童春华,刘昌定,熊坚等同志在工作中给予很多帮助,孙国良同志校核了全文,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] A. Labeyrie; *Astron. Astrophys.*, 1970, **6**, No. 1 (May), 85.
- [2] J. C. Dainty; 《激光斑纹及有关现象》, (科学出版社,北京,1981年), 256.
- [3] S. P. Worden; *Vistas Astron.*, 1977, **20**, No. 3 (Jan), 301.
- [4] D. Y. Gezari *et al.*; *Astrophys. J.*, 1972, **173**, No. 1 (Apr 1), L1.
- [5] D. R. Beddoes *et al.*; *J. O. S. A.*, 1976, **66**, No. 11 (Nov), 1247.
- [6] A. Blazit *et al.*; *Astrophys. J.*, 1977, **214**, Part 2 (Jun 1), L79.

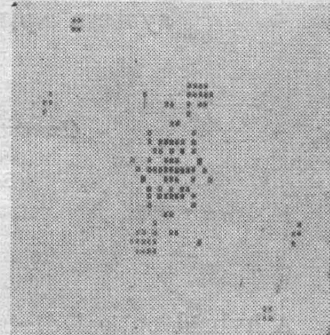


图 6 斑点全息术重现的双星像
Fig. 6 Image of double stars reconstructed by speckle holography

Simulation experiments of a hybrid optical/digital image processing system applicable to stellar speckle interferometry

SHEN MANGZUO AND WANG WEIJIAN

(Institute of Optics and Electronics, Academia Sinica, Dayi)

(Received 23 March 1983; revised 17 June 1983)

Abstract

A hybrid optical/digital image processing system applicable to stellar speckle interferometry in order to attain diffraction limited resolution of sky telescope is described. It consists of a coherent optical processor, a microdensitometer and a microcomputer. Following a brief analysis of the requirements for the data processing in stellar speckle interferometry, the system configuration and design are presented. Simulation experiments demonstrate the satisfactory performance of the system. Some further developments and potential applications are also discussed.