

斑纹全息术天文高分辨率像复原实验

邱耀辉 刘 忠 楼 柯 卢汝为 钱 苹
(中国科学院云南天文台, 昆明 650011)

摘 要 简要地介绍了斑纹全息术的原理, 报道了用斑纹全息术对两天文双星 ADS11344 和 ADS16648 进行的高分辨率像复原观测结果。

关键词 斑纹全息术, 像复原, 傅里叶变换。

口径为 D 的天文望远镜, 理论衍射极限分辨率 $\phi = \lambda/D$ (其中 λ 为光波长), 口径越大分辨率越高, 当 $\lambda = 550 \text{ nm}$ 时, 口径为 1 m 和 10 m 的望远镜, ϕ 分别为 $0.14''$ (角秒) 和 $0.01''$ 。但是, 由于地球大气湍流的干扰, 使基于地面的天文望远镜成像受到严重影响, 当使用传统的长曝光天体摄影术时, 其分辨率 $\phi = \lambda/r_0$, 即完全取决于大气相干长度 r_0 ^[1, 2] (大气视宁度参数或 Fried 参数), 而与望远镜口径无关。即使在良好大气视宁度条件下, r_0 也只有 10 cm 左右, 对应的分辨率仅为 $1''$, 例如图 1 所示为双星 ADS11344 和其参考星的长曝光像, 曝光时间为 4 s , 图中的分辨率约为 $1''$, 看不到任何小于 $1''$ 的细节。

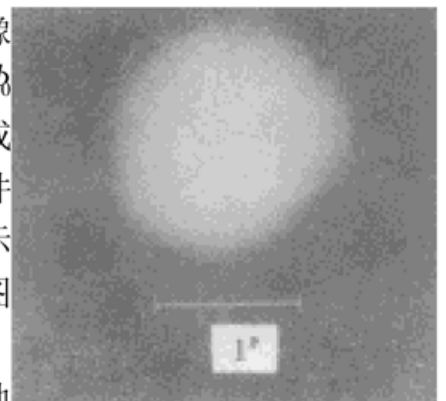


Fig. 1 A long-exposure image of binary ADS11344

为了克服地球大气湍流对天文观测的严重影响, 充分发挥地面大口径望远镜的高分辨成像功能, 1970 年法国的 Labeyrie 提出了斑纹干涉术^[3], 开创了斑纹成像技术的研究领域, 发展了多种高分辨率像复原方法。本文主要介绍斑纹干涉术在二维像复原中的运用, 简述了斑纹全息术^[4-5]的原理; 并报道对两个天文目标进行的高分辨率斑纹全息术像复原。

1 斑纹全息术原理

1.1 斑纹干涉术原理简述

由于大气折射率的随机变化, 使大气-望远镜成像系统成为非确定性系统, 其点扩展函数 (PSF) 或光学传递函数 (OTF) 都是随机过程。大量实验表明, 当曝光时间 $t \leq 10 \text{ ms}$ 时, 大气湍流相干元的结构被“冻结”, 此时点扩展函数呈现为随机分布的斑纹组成的散斑像, 因各斑纹的大小接近望远镜的衍射极限爱里斑, 所以它含有望远镜理论分辨率的高频信息, 被称为“斑纹图”。由于瞬时点扩展函数不含时间平均效应, 所以是随机过程点扩展函数的样本。相应地称目标的瞬时像为“目标斑纹图”, 图 2 为用云南天文台斑纹探测系统在 1 m 望远镜上拍

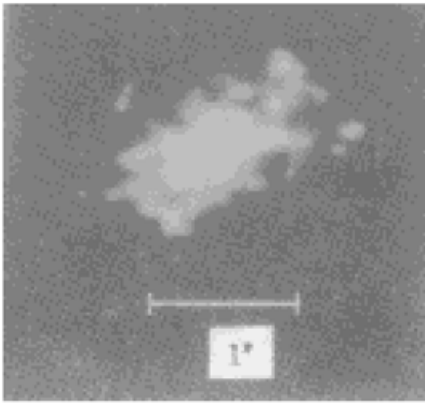


Fig. 2 A speckle image of binary ADS11344

摄的双星 ADS11344(含参考星)的一幅斑纹图,曝光时间0.02 s。

设在某时刻大气-望远镜综合系统的瞬时点扩展函数为 $p(x)$, 其中 x 为二维空间坐标变量, 天文目标强度分布为 $o(x)$, 若目标在等晕区内, 得到的瞬时目标像——斑纹图 $i(x)$ 满足下面的空间不变线性系统卷积成像公式:

$$i(x) = o(x) \odot p(x) \quad (1)$$

式中 \odot 表示卷积算符。等价地常用它的傅里叶变换式:

$$I(u) = O(u)P(u) \quad (2)$$

这里大写字母表示相应量的傅里叶变换, u 为二维空间频率坐标变量。 $P(u)$ 为大气-望远镜综合系统的瞬时光学传递函数, 由上述的点扩展函数性质可知, 它使目标斑纹图的傅里叶谱 $I(u)$ 含有望远镜衍射极限截止频率的信息, 是斑纹成像技术的宝贵信息资源。

斑纹干涉术是计算目标一系列斑纹图的自相关二阶矩统计, $i(x)$ 的自相关定义为:

$$i^{(2)}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} i(x')i(x'+x)dx' \quad (3)$$

它的傅里叶变换为目标斑纹图的功率谱 $I^{(2)}(u)$, 由于斑纹图是实函数, 满足厄米性: $I^*(u) = I(-u)$, 其中 $*$ 表示复共轭, 则有:

$$I^{(2)}(u) = I(u)I(-u) \quad (4)$$

由(2)式有:

$$I^{(2)}(u) = O^{(2)}(u)P^{(2)}(u) \quad (5)$$

其中 $O^{(2)}(u)$ 为目标的功率谱, $P^{(2)}(u)$ 为瞬时点扩展函数的功率谱, 当统计的样本数 N (斑纹图幅数) 足够大时可由时间平均得到总体平均, 斑纹图的平均功率谱为:

$$\langle I^{(2)}(u) \rangle = \langle O^{(2)}(u) \rangle \langle P^{(2)}(u) \rangle \quad (6)$$

其中 $\langle \rangle$ 表示时间平均, 称 $\langle P^{(2)}(u) \rangle$ 为“斑纹干涉术传递函数”(SIOTF)。Korff 的理论分析表明^[6], 它具有望远镜的衍射极限截止频率, 因此斑纹干涉术是一种高分辨率信息处理方法, 但由于是傅里叶谱的模的平方, 位相信息被丢失了, 由下式的除法消卷积只能得到目标的功率谱(或模):

$$O^{(2)}(u) = \langle I^{(2)}(u) \rangle / \langle P^{(2)}(u) \rangle \quad (7)$$

$\langle P^{(2)}(u) \rangle$ 一般由观测在时间和空间上与目标尽量接近的一点源单星(定标星)的近 N 幅斑纹图并计算其平均功率谱得到。等价地由对目标功率谱的傅里叶逆变换得到目标自相关 $o^{(2)}(x)$, 在天文观测应用中仅能得到双星成员的角距和分布方位^[7], 而非二维复原像。

1.2 斑纹全息术原理的傅里叶谱描述

斑纹全息术是特殊条件下的斑纹干涉术, 它能复原目标的二维像。这“条件”就是: 在被分辨目标的等晕区内(约 5") 有一点源单星(参考星), 它的作用类似于全息光学中的参考光束, 使目标的全部信息得以保存下来。设参考星的位置在 x_0 处, 用 $\delta(x - x_0)$ 表示, 当把目标和参考星作为一个总目标来观测时, 总目标 $o_t(x)$ 为:

$$o_t(x) = o(x) + \delta(x - x_0) \quad (8)$$

对上式傅里叶变换为总目标的谱:

$$O_t(u) = O(u) + \exp(-i2\pi ux_0) \quad (9)$$

用斑纹干涉术可得到总目标的功率谱 $O_i^{(2)}(u)$, 注意到 $o_i(x)$ 为实函数, 利用上式有:

$$O_i^{(2)}(u) = O_i(u)O_i(-u) = [O(u) + \exp(-i2\pi ux_0)]\{O(-u) + \exp[-i2\pi(-u)x_0]\} = O^{(2)}(u) + O(u)\exp(i2\pi ux_0) + O(-u)\exp[i2\pi(-u)x_0] + 1 \quad (10)$$

据傅里叶变换性质中的相移定理, 有傅里叶变换对:

$$O(u)\exp(\pm i2\pi ux_0) \Leftrightarrow o(x \pm x_0)$$

\Leftrightarrow 表示箭头两边的函数互为傅里叶变换; 按傅里叶变换的性质, 下面的傅里叶变换对成立:

$$O(-u) \Leftrightarrow o(-x), \quad 1 \Leftrightarrow \delta(x)$$

则对(10)式进行傅里叶逆变换得到的总目标自相关为:

$$o_i^{(2)}(x) = o^{(2)}(x) + \delta(x) + o(x + x_0) + o(-x + x_0) \quad (11)$$

在空间域中也可推导得此结果(详见文献[8])。上式等号右边的头两项分别为位于坐标原点(图的中央点)和中央区的被分辨目标的自相关和 δ 函数, 后两项分别为目标的复原像及其镜像, 文献[8]中的计算机模拟实验表明: 它们分别位于图中央的左边和右边。由此可见斑纹全息术可得到被分辨目标的高分辨率复原像 $o(x + x_0)$ 。

2 斑纹全息术天文观测实验

2.1 观测条件

1995年8月1日, 用云南天文台1 m口径天文望远镜对两双星目标 ADS11344 和 ADS16648 进行了斑纹全息术观测, 斑纹探测器为视频 ICCD(德国 SIM-ICCD-05/s), 大气视宁度参数如下: $r_0 \approx 10$ cm; 等效焦距为 125 m; 观测的光通带宽 $\Delta\lambda = 50$ nm, 中心波长 $\lambda = 520$ nm; 每幅斑纹图曝光时间为 0.02 s, 大小为 256×256 像元, 经预处理后变为 128×128 像元; 1 m 镜的理论衍射极限分辨率 $0.14''$ 对应于 3 个像元; 斑纹图的采集记录速度为 6 幅/秒; 斑纹图记录幅数: 目标 ADS11344: 4000 幅, 定标星: 3716 幅; 目标 ADS16648: 4000 幅, 定标星: 3713 幅。

2.2 数据处理步骤

1) 对斑纹图进行平场、暗场改正, 消除行间错位, 进行斑纹图间大气视宁度的校准, 消除功率谱中的噪声偏差项; 2) 分别计算总目标和定标星斑纹图的平均功率谱 $\langle I_i^{(2)}(u) \rangle$ 和 $\langle R^{(2)}(u) \rangle$; 3) 用(6)式消卷积得到总目标的功率谱 $O_i^{(2)}(u)$; 4) 对总目标的功率谱进行傅里叶逆变换得到总目标的自相关 $o_i^{(2)}(u)$; 5) 测量目标复原像给出的有关参数。

2.3 观测结果

用斑纹全息术得到的双星 ADS11344 和 ADS16648 复原像分别示于图 3 和图 4, 对它们的测量结果为: 目标 ADS11344 两成员的角距为 $0.27''$, 强度比为 $1 \cdot 0.75$, 两成员到定标星(在坐标原点)的角距分别为 $0.76''$ 、 $0.98''$; 目标 ADS16648 两成员的角距为 $0.15''$, 强度比为 $1 \cdot 0.98$, 两成员到定标星(在坐标原点)的角距分别为 $2.26''$ 和 $2.23''$, 星表^[9]和本文作者用其它方法进行的二维像复原结果表明: 此两双星各与它们的参考星分别构成了两个三星系统, 从而得到两个三星系统中除了第三成员的相对强度值外的所有其它信息。

结 语 斑纹全息术的实用性仅限于那些为数不多的在等晕区内含有一参考星的目标, 但它的技术依托是斑纹干涉术, 原理简明, 理论严密, 在众多二维像复原方法中, 它最简捷, 因而

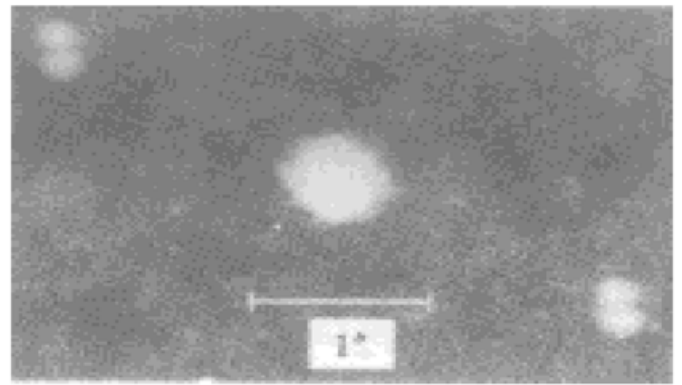
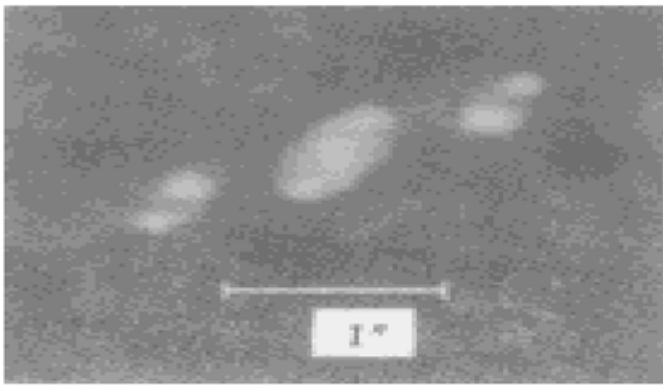


Fig. 3 The reconstructed image of binary ADS11344

Fig. 4 The reconstructed image of binary ADS16648

是受各种噪声干扰最小、复原像质最好的一种方法,而且处理过程中所需的计算量远远小于其它像原方法的要求,本实验再一次证明了其原理的正确性。为了充分地发挥这一优势,引发了一项正处于发展中的设置人造参考星技术,一旦成功,可在斑点成像和自适应光学中发挥重大作用。

参 考 文 献

- [1] J. W. 顾德门. 统计光学. 秦克诚等译, 北京: 科学出版社, 1992. 388, 461
- [2] D. L. Fried. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**(10) : 1372~ 1379
- [3] A. Labeyrie. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by Fourier analyzing speckle patterns in star images. *Astron. Astrophys.*, 1970. **6**(1) : 85~ 87
- [4] C. Y. C. Liu, A. W. Lohmann. High resolution image formation through the turbulent atmosphere. *Opt. Commun.*, 1973, **8**(3) : 372~ 377
- [5] R. H. T. Bates, P. T. Gough, P. J. Napier. Speckle interferometry gives holograms of multiple star systems. *Astron. Astrophys.*, 1973, **22**(2) : 319~ 320
- [6] D. Korff. Analysis of a method for obtaining near diffraction limited information in presence of atmospheric turbulence. *J. Opt. Soc. Am.*, 1973, **63**(8) : 971~ 980
- [7] 王义明, 邱耀辉, 吕瑞宁等. 三对双星的斑点干涉术观测. *天文学报*, 1987, **28**(4) : 410~ 415
- [8] 邱耀辉, 吕瑞宁, 钱 莘等. 斑点全息术原理及计算机模拟实验. *云南天文台台刊*, 1992, (2) : 48~ 52
- [9] Sky Catalogue 2000. 0 Vol. 2 Double Stars. *Variable Stars and Nonstellar Objects*, Edited by Alan Hirshfeld, Roger W. Sinnott, New York: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1985.

An Experiment in Astronomical High Resolution Image Reconstruction with Speckle Holography

Qiu Yaohui Liu Zhong Lau Ke Lu RuWei Qian Ping
(Yunnan Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

(Received 18 November 1997; revised 9 February 1998)

Abstract The principle of speckle holography was introduced briefly. The observation of high resolution image reconstruction with speckle holography for two astronomical double stars ADS11344 and ADS16648 was reported.

Key words speckle holography, image reconstruction, Fourier transform.