

时间分幅型二维光子计数斑点像探测系统

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

摘 要 在简要叙述了云南天文台斑点相机研制的改进的概况之后, 介绍了对新型斑点相机 YOSC-4——时间分幅型二维光子计数斑点像探测系统的研制情况及该系统的性能。试验和分析表明: 当进行天文斑点成像观测时, 该系统极限星等达到 12^m ; 随后给出了一些实际的斑点图观测资料和像复原结果。

关键词 斑点成像, 斑点照相机, 微光探测器。

1 引 言

因受随机大气湍流的干扰, 当使用传统的长曝光天体摄影术时, 无论望远镜口径有多大, 天文成像的分辨极限被限制在 $1''$ (角秒) 左右。为了充分发挥地面大口径天文望远镜的分辨本领, 满足日益增长的高分辨极限天文观测的需要, 经各国科学家 20 多年的共同努力, 形成了一种新的观测方法: 斑点干涉成像(简称“斑点成像”)技术, 它能有效地消除大气的不良影响, 实现地基天文望远镜的衍射受限分辨极限像复原。

在斑点成像技术中, 原始资料是天文目标的一系列短曝光干涉像, 被称为“斑点干涉图”(简称斑点图)。在高分辨极限像复原数据处理方法成熟的情况下, 像复原的成败依赖于所得到的斑点图的数量和质量, 而这取决于望远镜和专用终端设备: 斑点相机的性能。与国际上的情况相似, 在研究由斑点图复原目标像的方法的同时, 总是伴随着对斑点相机的研制和改进, 云南天文台从 1984 年开始研究斑点成像技术以来, 先后共研制了 4 种型号的斑点照相机: YOSC(Yunnan Observatory Speckle Camera)-1~ YOSC-4。本文从对斑点成像原始数据的特殊要求出发, 回顾云南天文台研制斑点相机的概况, 介绍 1994~ 1997 年对新型斑点相机 YOSC-4 的研制情况, 它的结构和性能, 随后给出了对几个天文目标的斑点图观测和像复原结果, 最后对该系统作一简评。

2 YOSC 的研制与改进

1970 年法国 Labeyrie 提出恒星斑点干涉术^[1], 开创了天文高分辨极限像复原的研究领域。至 1985 年, 先后提出了几种 2 维像复原方法^[2-9], 像复原的研究在理论上已基本成熟, 并得到了初步应用。随后形成了现今的“斑点成像技术”。云南天文台于 1984 年开始投入斑点成

像技术的研究工作, 第一步就是研制云南天文台 1 型斑点照相机 YOSC-1; 随着研究工作的不断深入, 先后研制了 4 种型号的斑点相机。由下面的分析可看出, 这些相机的改进主要集中在探测器性能的改进方面。

2.1 对斑点照相机的参数要求

理论^[10, 11]分析和实践表明, 对斑点图资料的观测必须满足以下基本要求才能实现高像质复原:

1) 斑点图应含有望远镜衍射受限截止频率的高频信息。这取决于拍摄每幅斑点图时是否满足所要求的时间相干性和空间相干性。对于时间相干性, 曝光时间 Δt 取大气的相干时间(在此时间内, 大气湍流结构呈“冻结”状态), 一般约为 10 ms(实践证明, 当大气视宁度较好时, 可适当延长曝光时间至数十分之一秒), 否则时间平均效应将使高频信息消失; 对于空间相干性, 光波通带宽 $\Delta\lambda$ 与大气相干直径(或大气视宁度参数) r_0 和望远镜口径 D 密切相关, $\Delta\lambda = \lambda r_0 / D$, λ 为光中心波长, 例如当 $r_0 = 10$ cm(在较好大气视宁度条件下), $\lambda = 550$ nm, $D = 1$ m 时, $\Delta\lambda$ 仅为 55 nm, 在此严格限制下方能得到清晰的干涉图样, 否则色散将使高频结构消失。短曝光和窄通带将大大限制进入探测系统的光能量。

2) 因电何耦合器件探测器的离散像元式结构, 使所得到的数据被离散化, 由于数据处理需要, 应满足离散傅里叶变换所要求的采样定律: 望远镜衍射受限角分辨极限(爱里斑半峰宽)所占像元数应 p 大于或等于 2, 为此成像系统应有足够的焦长(放大倍率)。这又将使落到探测器单个像元上的光能量大为减少。

3) 应获取尽量多的斑点图幅数 n 。因理论分析表明, 斑点成像技术中各统计处理方法的信噪比 $\text{SNR} \propto n^{1/2}$ 。实践表明: 对于中、低亮度目标, n 的数量级应分别为 1×10^3 和 1×10^4 才能得到较好的像复原结果。

4) 为确保在观测记录 $2n$ 幅斑点图(目标和参考星各 n 幅)期间大气统计性质不变和小的起伏方差, 以便消除目标和参考星的斑点图观测期间因大气视宁度差异而引入的非线性误差^[12], 探测和记录应在尽量短的时间内完成, 因此要求有足够高的数据记录速度。实践表明, 在较好大气视宁度条件下, 此期间不应长于 20 min。

5) 由于天文目标一般都比较暗弱, 再加之上述 1)、2) 两项对进入探测系统光能量的限制, 斑点照相机应有很高的微光探测能力。

6) 望远镜的口径越大, 复原像的分辨极限就越高, 斑点成像技术的效益就越高。

2.2 YOSC 的基本结构

为了不断地采用新技术改进斑点相机的微光探测能力, 提高数据采集速度和存储容量, 云南天文台自 1984 年以来先后研制了 4 种斑点相机, 除探测器之外它们的结构和参数是相同的, 即: 与云南天文台 1 m 望远镜的机械接口; 在 1 米镜的卡塞格林焦点之后是一个消大气色散的棱镜, 再经过一个 10 倍放大率的二次成像镜(显微物镜), 使系统的等效焦长约为 130 m; 接下来是一组滤光片, 中心波长为 580 nm 和 530 nm, 带宽可在 10 ~ 50 nm 间可调换(见图 1), 后继的探测器则是历次改进的主要内容。表 1 给出了 4 种型号斑点相机的结构和性能比较。

表中 CCD-1 是云南天文台 1985 年研制的第一种 2 维电荷耦合器件探测器, 无光增强功能, 光灵敏度稍高于摄影胶片, 有制冷系统, 噪声低, 但读取速度较慢。增强器是云南光学仪

Table 1. The comparison of the structure and function of four types of Yunnan Observatory speckle camera

type	detector	imaging-couple way	limiting magnitude	collection rate
YOSC-1	film	direct two times imaging	3 ^m	20 frame/min
YOSC-2	CCD-1	direct two times imaging	4 ^m	12 frame/min
YOSC-3	intensifier+ CCD-1	lens coupling	7 ^m	12 frame/min
YOSC-4	ICCD	fibre coupling	12 ^m	720 frame/min

器厂造的 3 级磁聚焦像增强器, 光增益为 10^4 量级, 在 YOSC-3 中, 经二次成像镜后, 像增强器光阴极上的像经一个光学透镜耦合到 CCD-1 的成像芯片上后输入计算机, 按透镜的直径和物距、像距估算, 透镜耦合的光能损失率约为 0.5。用 YOSC-3 对一些 6^m (视星等为 6 等的星) 左右亮度的双星进行了成功的斑点干涉术观测, 获得了较好的高分辨极限观测结果^[13]。但由于增强器噪声严重, CCD-1 的记录速度太慢, 存储容量太小, 每观测 150 幅斑点图就要转存到磁带上(速度同样地慢), 每夜仅能观测两组目标(含参考星), 这些都远远不能满足进行像复原观测的技术要求。表中每幅图大小为 128×128 像元。在用斑点掩模法进行 2 维像复原的初步研究时, 为排除噪声干扰, 采用 YOSC-2 斑点相机, 得到了对几个 3^m 左右亮度天文目标复原像^[12], 也因上述原因, 观测到的斑点图幅数太少(每个目标 150 幅), 即使是 3^m 左右的亮目标, 复原结果的信噪比却很低。YOSC-1 型斑点相机为以后的机型奠定了基础, 但不适用, 可见 YOSC-1~ YOSC-3 型斑点相机的性能距上述要求相距太远, 必须研制新的斑点相机。

3 YOSC-4 的研制、结构和性能

3.1 新型微光探测器的性能和选用

由上述可知, 对斑点相机的改进应着重于提高探测器的微光探测能力和数据采集速度及扩展存储容量等方面, 我们选用了德国造(SIM-ICCD-05/S 型)增强型电荷耦合器件(Intensified CCD), 具有较高微光探测能力, 其增强器是超二代 18 mm 直径 MCP (Micro Channel Plat), 经光纤耦合到 756×581 像元的 CCIR(625/50) 制式视频电荷耦合器件上, 量子效率为 12%。探测器的光灵敏度为 1×10^{-6} lx。光谱响应为 400~ 960 nm, 峰值响应在 600 nm 附近。具有电子快门, 可从 20 ms~ 100 ns 调整曝光时间, 帧转移速率为 1/25 s。该探测器的问题是, 其控制手柄性能不稳定, 于 1997 年对之进行了彻底的改造。由于很高的灵敏度, 在观测低亮度水平目标时, 斑点像呈现为离散光子事件组合, 按照 Northcott 等人^[15]的分类, 属于时间分幅型 2 维光子计数像探测器。图 1 给出新型斑点像探

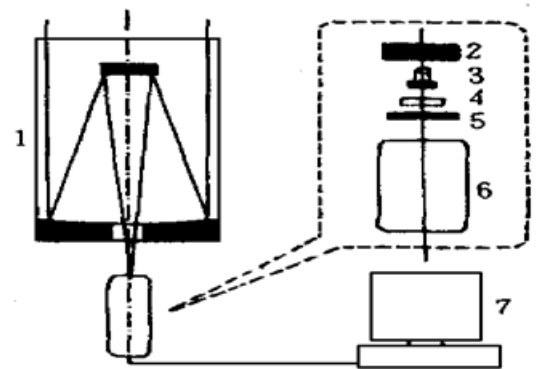


Fig. 1 The structure of the speckle camera YOSC-4. 1: telescope, 2: prism for the elimination of atmospheric dispersion, 3: microscopical objective, 4: filter, 5: photon gate, 6: ICCD, 7: computer

测系统 YOSC-4 的结构图, 由望远镜和斑点相机光学系统及探测器和计算机及其图像采集存储系统软硬件组成。

3.2 对增强型电荷耦合器件(SIM-05/S)微光探测能力的检验和探测极限星等的推算

为了检验增强型电荷耦合器件(SIM-05/S)的微光探测能力, 于1996年10月与北京国家标准计量局合作, 测量了它的光灵敏度。实验过程大致为: 以亮度可调的标准白光光源作为增强型电荷耦合器件的探测对象, 先把标准光源的亮度调到1 lx, 然后在光路中逐次加入标准减光板, 有各种不同光透过率的减光板可供选用, 当加到某一次时, 增强型电荷耦合器件的输出仍有微小响应, 而再加入下一块后, 增强型电荷耦合器件的输出信号基本无变化, 计算出此时剩余的光强即为增强型电荷耦合器件的光灵敏度。测量结果为 1×10^{-6} lx。这已是相当暗弱的照度。为了与探测器的光子计数探测性质相比较, 下面对探测器在此照度下所探测的光子数作一估计: 为简化计算, 以光波长为555 nm计, 其频率 $\nu = 540 \times 10^{12}$ Hz, 已知此时光功当量 $\rho = [(1/683) \text{ W/m}^2]/\text{lx}$, 则 1×10^{-6} lx 对应的光通量 $\Phi = \rho \times 10^{-6} \text{ W/m}^2 \approx 1.464 \times 10^{-9} \text{ lm}$; 普朗克常数 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J/s}$, 则频率为 ν 的一个光子的能量 $E_p = h\nu \approx 3.58 \times 10^{-19} \text{ J}$; 则 1×10^{-6} lx 对应的光子数为 $N_1 = \Phi/E_p \approx 4089 \times 10^6/\text{s} \cdot \text{m}^2$ 。考虑增强型电荷耦合器件的 MCP 半径 $r = 9 \text{ mm}$, 其视频图像每场的曝光时间 $t = 0.02 \text{ s}$, 增强型电荷耦合器件量子效率 $\eta = 0.12$, 则在 1×10^{-6} lx 照度下, 增强型电荷耦合器件的每场图接收到的光子数 $N_2 = N_1 \pi r^2 \eta \approx 2496$, 它们将随机而均匀地分布在增强型电荷耦合器件的 $756 \times 581 = 439236$ 个像元上, 可见该增强型电荷耦合器件能对单个光子作出有效响应输出, 输出结果为离散光子事件。

在实际天文观测中, 人们关心的是能观测到几等亮度的目标? 下面对 YOSC-4 能观测的最暗目标的星等作一推算。先考虑星等 $M = 13$ 的 13^m 星, 由下面天文学中星等各为 M_1 、 M_2 , 亮度各为 I_1 、 I_2 的两个星体的星等差与亮度比的关系式: $M_2 - M_1 = -2.5 \lg(I_2/I_1)$ 和有关测量资料^[16, 17]可推知, 13^m 星在地面上的照度 $L_{13} \approx 1.15 \times 10^{-11} \text{ lx}$, 同样设光中心波长为555 nm, 对应的光通量 $\Phi_{13} = L_{13} \rho \approx 1.68 \times 10^{-14} \text{ lm}$; 若用云南天文台1米望远镜观测, 当不考虑斑点相机的滤光片和消色散棱镜时, 设成像系统的有关参数如下: 1米镜反射式主镜半径 $R = 0.5 \text{ m}$, 考虑到反射式副镜, 则有效受光面积 $a = 0.9\pi R^2$, 主、副镜面的反射率 γ 均为0.8, 斑点相机的二次成像镜的两组透镜的透过率 p 均为0.95, 则经1米镜到达增强型电荷耦合器件接收面上的光能流为: $E_{13} = \Phi_{13} a \gamma^2 p^2 \approx 6.86 \times 10^{-15} \text{ J/s}$, 它所对应的光子数 $N_{13} = E_{13}/E_p \approx 19162/\text{s}$, 则增强型电荷耦合器件的每场图接收到的光子数 $N_{l-13} = N_{13} t \eta \approx 46$, 实验表明, 对 13^m 的点源单星, 在较好大气视宁度条件下, 这些光子事件将较集中地分布在 $20 \times 20 = 400$ 像元上, 密于上述增强型电荷耦合器件的光灵敏度的光子分布, 所以还有微弱的响应。由此可见 13^m 星是 YOSC-4 在云台1米镜上的探测极限; 实际上还须考虑消色散棱镜(透过率0.90)和滤光器(通带宽以100 nm计), 二者总透过率为 $0.90 \times 0.33 \approx 0.30$, 此时容易看出其可观测的极限星等为 12^m (比 13^m 星亮2.5倍), 在 $20 \times 20 = 400$ 像元上将接收到30多个光子事件。

3.3 YOSC-4 的数据采集存储系统配置和实际观测能力

YOSC-4 虽有了新探测器, 还必须配置合适的数据采集系统才能充分发挥其功能。本工作选用1台5X86微机, 钟频133 MHz, 采用8位PCI总线的MPE1000型图像采集卡, 容量为4.5Gbit的硬盘。由于是CCIR(625/50)制式的视频信号, 发现若采用一般帧积分模式, 将

使两场曝光间存在近 40 ms 的时间差, 更严重的是奇偶行间存在错位而产生的非线性误差, 为了消除上述弊病, 编制了专用数据采集软件, 采集 256×256 的一场视频图像(纵向一般为隔行记录, 横向取两相临像元之平均值得一新像元值)并消除空行后记录得到 128×128 像元的一幅斑点图, 结果既节约了 $3/4$ 的存储空间又使记录速度达到 12 frame/s, 已接近目前硬盘读写的极限速度。

用上述系统进行观测, 对于一般良好大气视宁度, 曝光时间取 $1/50$ s、波带宽取 50 nm、中心波长为 580 nm 时, 可以得到具有 1 米望远镜衍射受限爱里斑细结构的点源单星斑点图(亦即一幅斑点图曝光时的大气-望远镜综合系统的瞬时点扩展函数), 这表明可得到高质量的目标斑点图, 满足上述要求 1)。

由于 130 m 的焦长, 在由上述采集方式得到的图中一个增强型电荷耦合器件像元对应 $0.054''$ 的视场角, 则 1 米镜的衍射受限爱里斑半峰值宽($0.14''$)占 2 个多像元, 满足上述要求 2)。

对于 $128 \times 128 \times 8$ bit/幅的斑点图, 系统的记录速度达 12 frame/s, 在 15 min 内可观察 10000 多幅斑点图, 对于中、低亮度目标, 能基本满足上述要求 3) 和 4)。

由于是光子计数像探测器, 灵敏度很高, 在云南天文台 1 米望远镜上, 斑点成像技术的观测极限星等为 12^m , 基本能满足要求 5)。

高的光增益伴生的缺点是探测器的噪声较大, 例如光子噪声、附加噪声和其它更复杂的噪声和非线性基底等问题, 这些都增加了数据处理的复杂性。我们已经找到了改正像复原中噪声偏差的方法^[18], 得到了一批天文目标的高分辨极限像复原结果。

4 实际观测和像复原结果

下面给出于 1995 年 8 月 1 日在云南天文台 1 米望远镜上用 YOSC-4 斑点相机对一些中等亮度目标的观测结果。观测条件: 曝光时间约 $1/50$ s, 中心波长 530 nm, 波带宽 50 nm, 大气视宁度参数 r_0 约为 10 cm, 每幅斑点图大小为 128×128 像元, 在 20 min 内记录了目标和它的参考星各 3000 多幅。各目标的斑点图由含有高频信息的斑点组成, 以这些斑点图为原始数据, 经斑点成像技术的专门处理后, 得到了很好的复原像。

例如对目标双星 ADS16800(两成员星等均为 8.1^m 且光谱型相同)及其参考星, 得到的斑点图各为 3000 和 2496 幅, 图 2 为双星 ADS16800 的一幅斑点图, 图 3 为双星 ADS16800 的复原像, 其角距离为 $0.17''$, 强度比为 $1.00 \cdot 1.02$; 目标三星 Hu66(ADS11344)(三成员星等分别为 7.9^m , 8.1^m 和 8.2^m)和其参考星的斑点图分别为 4000 和 3716 幅。

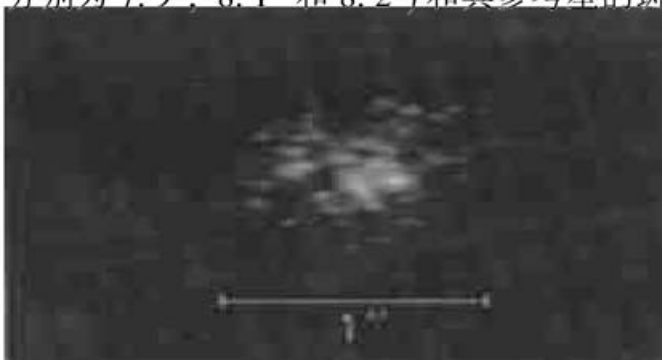


Fig. 2 A speckle image of ADS16800



Fig. 3 The reconstructed image of ADS16800

图 4 为三星 Hu66 的一幅斑点图, 图 5 为三星 Hu66 的复原像, 三成员的角距离分别为 $0.27''$ 、 $0.76''$ 和 $0.98''$, 强度比为 $1.00 \cdot 0.80 \cdot 0.60$; 三星 H1d171(ADS16648)(三成员星等分别为 9.9^m 、 10.4^m 和 8.2^m) 和其参考星的斑点图分别为 4000 和 3713 幅。

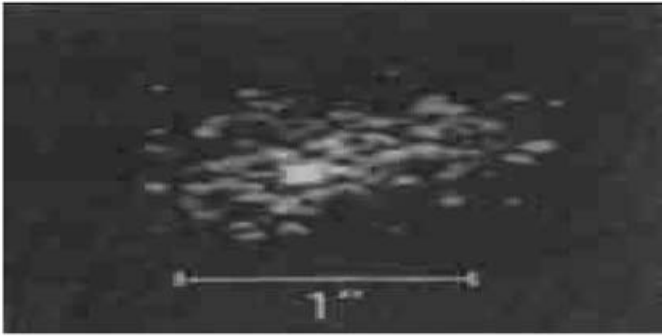


Fig. 4 A speckle image of Hu66



Fig. 5 The reconstructed image of Hu66

图 6 为三星 H1d171 的一幅斑点图, 图 7 为三星 H1d171 的复原像, 三成员的角距被分辨为 $2.26''$ 、 $2.23''$ 和 $0.15''$, 强度比为 $1.00 \cdot 0.10 \cdot 0.10$ 。这些目标的像均为消除大气干扰后的高像质复原结果, 实现了 1 米望远镜衍射受限分辨极限成像。



Fig. 6 A speckle image of H1d171

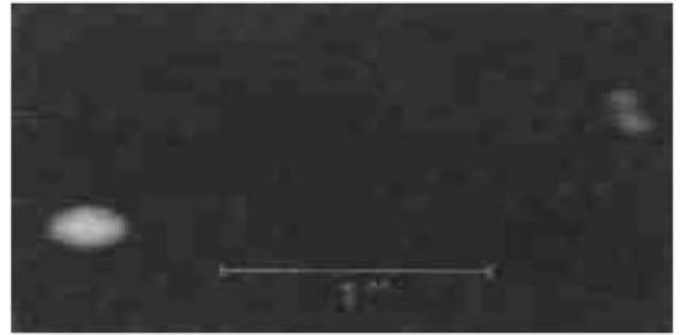


Fig. 7 The reconstructed image of H1d171

结 语 观测和像复原结果表明, 新的斑点像探测系统 YOSC-4 提供了较好的斑点图原始数据, 为实现天文目标的高分辨极限像复原奠定了坚实的基础, 微光探测器的高增益带来的问题是强噪声, 在找到了消除复杂噪声影响方法的情况下, 对之进行斑点成像技术处理后, 将有效地排除地球湍流大气的影响, 可对中等亮度及较暗弱目标实现高像质复原。

当望远镜的口径增大时, 虽增强了对暗弱目标的观测能力, 但分辨极限也随着提高了, 系统单位分辨元上的能量基本上保持不变, 只有对由分离点源组成的目标, 如双星等, 才会有提高极限星等的希望。目前国际上成功的斑点成像高分辨极限像复原观测, 报告最多的是德国 Weigelt 的研究组, 极限星等为 14^m , 采集速度为 12 frame/s/秒 , 每幅 512×512 像元, 每幅 100 多个光子, 探测器为 4 级像增强器, 光增益为 3×10^6 , 与之相比, 我们的探测系统还稍有差距。面对大多数更暗弱的天文目标, 要满足实用天文观测, 目前的斑点像探测系统都还需加以进一步改进。

参 考 文 献

- [1] Labeyrie A. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by Fourier analyzing speckle patterns in star images. *Astron. Astrophys.*, 1970, **6**(1): 85~ 87
- [2] Knox K T, Thompson B J. Recovery of images from atmospherically degraded short-exposure

- photographs. *Astrophys. J.*, 1974, **193**(1) : 45~ 48
- [3] Knox K T. Image retrieval from astronomical speckle patterns. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(11) : 1236~ 1239
- [4] Hunt B R, Fright W R, Bates R H T. Analysis of the shift-and-add method for imaging through turbulent media. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, **73**(4) : 456~ 465
- [5] Fienup J R. Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform. *Opt. Lett.*, 1978, (3) : 27~ 29
- [6] Weigelt G. Modified speckle interferometry: Speckle maskin. *Opt. Commun.*, 1977, **21**(1) : 55~ 59
- [7] Weigelt G, Wirnizer B. Image reconstruction by the speckle masking method. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(7) : 389~ 391
- [8] Lohmann A W, Weigelt G, Wirnitzer B. Speckle masking in astronomy—triple correlation theory and application. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24) : 4028~ 4037
- [9] Bartelt H, Lohmann A W, Wirnitzer B. Phase and amplitude recovery from bispectra. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18) : 3121~ 3129
- [10] Fried D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**(10) : 1372~ 1379
- [11] 戚康男, 秦克诚, 程 路. 统计光学导论. 天津: 南开大学出版社, 1987. 592~ 638
- [12] 邱耀辉, 吕瑞宁, 钱 苹等. 斑点掩模法像复原天文实验初步结果. 天文学报, 1992, **33**(3) : 280~ 286
- [13] 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
- [14] 刘 忠, 钱 苹. 二维光子计数系统. 云南天文台台刊, 1993, **51**(3) : 54~ 61
- [15] Northcott M J, *et al.*. Algorithms for image reconstruction from photon-limited data using the triple correlation. *J. Opt. Soc. Am.*, 1988, **5**(7) : 986
- [16] 赵凯华, 钟锡华. 光学. 北京: 北京大学出版社, 1984. 131
- [17] 张钰哲. 中国大百科全书(天文学). 北京, 上海: 中国大百科全书出版社, 1980. 530
- [18] 刘 忠, 邱耀辉, 楼 柯等. 改正重谱中噪声偏差的正性约束方法和天文高分辨力像复原实验. 光学学报, 1999, **19**(1) : 163~ 170

A Time-Framed 2-Dimensional Photon Counting Speckle Image Detecting-System

Qiu Yaohui Liu Zhong Lu Ruwei Lou Ke

(Yunnan Observatory The Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

(Received 17 August 1998; revised 27 October 1998)

Abstract After a simple surveying the development of the speckle camera in Yunnan Observatory, the R&D and the properties of a new speckle camera YOSC-4 —— a time-framed 2-dimensional photon counting speckle image detecting system are introduced. The test and analyses for the camera showed that the limit magnitude will be 12^m when it is used to do the observation of astronomical speckle imaging; and some real observation data of speckle images and image reconstructed results are given.

Key words speckle imaging, speckle camera, weak light detector.