

文章编号 1004-924X(2009)01-0092-06

捆绑式望远镜图像信噪比测量及分析

王鸣浩^{1,2}, 陈涛¹, 王建立¹, 刘欣悦¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了满足空间暗弱目标探测对大口径、短焦距望远镜系统的要求, 克服普通望远镜随着口径的增加焦距变长、视场变小的不足, 提出了将多镜筒捆绑在一起对同一空域进行观测, 通过软件的方式对采集的图像进行叠加来抑制背景随机噪声、提高图像的信噪比和系统的整体探测能力的设想。为了对上述设想进行验证, 利用4台110 nm望远镜搭建了捆绑式望远镜系统实验平台, 通过实际观测及事后处理验证了该设想并给出分析结果。实验结果表明: 图像信噪比平均提高1.58倍, 探测能力近似提高0.5个星等, 证实了该技术在保持对应焦距不缩小的前提下, 可以提高系统的探测能力。

关键词: 捆绑式望远镜; 图像叠加; 随机噪声; 信噪比

中图分类号: TP75 **文献标识码:** A

Measurement and analysis of image SNR in binding style telescope

WANG Ming-hao^{1,2}, CHEN Tao¹, WANG Jian-li¹, LIU Xin-yue¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: To meet the needs of detection of space faint objects for a telescope with large aperture and short focal, a binding drawtube telescope scheme to detect space object is presented to overcome the shortcomings that focal length grows and field of view shrinks with the increasing of aperture size in traditional telescope for space detection. The software methods are used to stack collected images to restrain background random noises and to improve image Signal to Noise Ratio(SNR) and the detecting ability of the whole system. In order to validate the above assumption, four stages of 110 mm telescopes is binded to establish a experimental platform. Through practical observation and post process, the assumption is validated and the analysis result is presented. Experimental results indicate that the image SNR is increased by 1.58 times and the detecting ability is increased by 0.5 magnitude as compared with those of traditional telescope. It is validated that the detecting ability can be improved when relevant focus length is maintained from reducing.

Key words: binding style telescope; image stacking; random noise; Signal to Noise Ratio(SNR)

1 引 言

观测夜空中移动着的暗弱空间小碎片,要求望远镜的口径大而焦距短。已知移动天体的探测能力与 D^2/f 成比例^[1],可见口径 D 和焦距 f 是都起作用的,但是要将传统的望远镜向大型化发展会受到很大的限制。一般说来,望远镜的焦距是会随着口径的加大而变长的(如果 F 数保持不变),并且可能导致视场范围大幅地缩小,因而口径加大的传统望远镜对提高探测空间碎片的能力并不明显。此外,研制大口径望远镜在技术困难、研制周期以及投资等方面都会遇到难以克服的困难。

上世纪 80 年代初期,为了降低造价,美国制造了一台用多个望远镜镜筒来合成一个大镜筒的所谓 MMT 望远镜^[2-4]。在 MMT 中,6 个口径 1.8 m 的独立望远镜镜筒被捆绑在一起,然后用 6 套光学系统(硬件)将 6 个镜筒各自的焦面图像投射到一个共同焦面上去。在此合成的焦面上,暗天体的亮度就增加了 6 倍,从而获得相当于一台 4.5 m 望远镜所能获得的亮度。但是也正是由于引入了这 6 套光学系统,却限制了所合成的望远镜的焦距不能太短,否则无法进行光路安排和设计。因此,MMT 形式并不很适于观测空间碎片这一任务。

但是近年来,随着 CCD 的应用,图像处理技术已获得了长足的发展。人们已意识到,对多个镜筒(例如 4 个 1 m 镜筒)焦面上各自的 CCD 图像,直接用图像处理技术将 4 幅图像相加,应该也可以同样起到对暗天体亮度叠加的效果,从而可完全不用复杂的光学系统来实现相加。进一步的分析表明:由 4 幅 CCD 图像所叠加的合成图像上,暗天体所占像元上的光电信号被叠加到 4 倍。然而 CCD 的噪音(热噪音和读出电路的噪音)数量较小,只占像元数值的极小一部分,并且具有随机误差特点,也就是说 4 个 CCD 上的噪音不会在精确对应的像元上发生相加。再考虑到空间碎片观测时,CCD 的曝光时间很短,仅为秒级,因此 CCD 相应的噪声远未达到饱和程度(需几小时才饱和)。所以,叠加后的合成图像能只使信号叠加而对噪音并不增加,也即信噪比显著提高,这正是人们希望的效果。另外,对于单孔径探测系统,长

时间积分会使像元出现饱和和溢出,而对于此种“捆绑式望远镜”,各个孔径仅仅需要 1/4 的积分时间就可以使最终叠加的图像达到相同的灰度水平,且各帧图像不会出现饱和现象。

美国也正在研制应用图像叠加技术的大型多镜筒望远镜以探测暗弱的近地球小天体(与空间碎片类同)。新研制的望远镜称为 Panoramic Survey Telescope & Rapid Response System^[5]。它将采用 4 架 1.8 m 望远镜组成一台 3.6 m 等效望远镜,利用图像处理技术将 4 架望远镜分别获得的 CCD 图像进行叠加。今年已在调试第一架望远镜筒,预计 2009 年(或之后)才能完成全部 4 架的组合^[6]。

本实验对“图像软件叠加技术”的正确性和可行性进行了验证,为将来研制探测空间碎片的大型望远镜提供基础。本实验借用了 4 台 110 mm 的望远镜(包括其 CCD 相机),然后把它们并联装在一个精密跟踪架上,完成软、硬平台的搭建,以对上述图像叠加新技术进行验证,同时可取得宝贵的实践经验,使这一新技术能够尽快地成熟完善。

2 原 理

为验证捆绑式望远镜信噪比提高程度,本实验需要将对准同一空域采集的 4 幅图像进行叠加,所得对应目标区域的图像关系如图 1 所示:

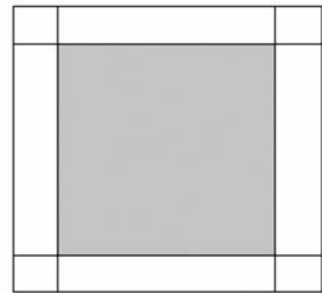


图 1 图像采集区域

Fig. 1 Image acquisition area

其中灰色区域表示 4 幅图像所包含的公共目标区域,而白色区域表示非公共区域,所以首先需要对采集的图像进行必要的几何变化和图像配准。然后在叠加后的图像和各个单帧图像中随机选取 40 个目标作为信噪比计算的对象。在对不

同曝光时间的图像计算后,取其信噪比提高程度的平均值作为结论给出。

2.1 图像配准

假设有一幅定义在 (w, z) 坐标系上的图像 f 经过几何变形后产生了定义在 (x, y) 坐标系上的图像 g ,这个坐标系变换可以表示为:

$$(x, y) = \mathbf{T}(w, z), \quad (1)$$

仿射变换是最常用的一种空间变换形式,可以用如下矩阵形式表示:

$$\begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w & z & 1 \end{bmatrix} \mathbf{T} = \begin{bmatrix} w & z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & 0 \\ t_{21} & t_{22} & 0 \\ t_{31} & t_{32} & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

该变换可以按比例进行缩放、旋转、平移或剪切等,具体取决于 \mathbf{T} 的元素取值。本实验需要将不同靶面上的图像数据按同一参考配准,所以只涉及到比例缩放、平移及旋转操作, \mathbf{T} 的形式如表 1 所示。

表 1 仿射变换类型

Tab. 1 Affine transformation types

比例 缩放	$\begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = s_x w$ $y = s_y z$
旋 转	$\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = w \cos \theta - z \sin \theta$ $y = w \sin \theta + z \cos \theta$
平 移	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \delta_x & \delta_y & 1 \end{bmatrix}$	$x = w + \delta_x$ $y = z + \delta_y$

2.2 信噪比

本实验应用图像的信噪比公式进行衡量,而非单个 CCD 相机的信噪比公式,这样做的目的在于考察多幅图像叠加后信噪比与单帧图像信噪比的提升程度,并以比值形式给出。具体公式如下:

$$\text{SNR} = \frac{\bar{S} - \bar{B}_g}{\sigma}, \quad (3)$$

其中, \bar{S} 为目标的均值; \bar{B}_g 为背景的均值; σ 为背景的标准方差。

2.3 随机噪声信号的抑制

在用 CCD 进行探测时不可避免地引入噪声,造成噪声的主要过程有两个:(1)CCD 器件的光

敏表面接收到的光子数量是随机波动的,这样就不可避免地引入噪声;(2)CCD 器件在读出、处理信号时,电路也会产生随机热噪声。后者众所周知,是具有均匀功率谱的零均值高斯过程,而前者相对复杂些,光子噪声的产生是与所在光敏表面位置无关的,因此也就不服从均匀功率谱的特性^[7],但是可以通过极限情况来讨论:当光敏表面接收到的光子数量很少的时候(积分时间短),光子噪声近似服从泊松分布;而光敏表面接收到的光子数量很多的时候(积分时间长),光子噪声近似服从高斯分布。无论那一种情况,接收到的光子数量是多是少,其均为一个随机量。CCD 的热噪声和读出噪声的数量很小,且具有随机误差的特点,也即 4 个 CCD 上的噪音不会在精确对应的像元上发生相加。考虑到空间碎片观测时 CCD 的曝光时间很短,仅为秒级,因此 CCD 相应的噪音远未达到饱和程度(需几小时才饱和)。可以说,合成图像能只使信号叠加而对噪音并不增加,也即信噪比提高了。

3 实验平台简介

3.1 实验平台

3.1.1 光学镜头

本实验采用 4 个同型号光学镜头,其主要参数如下:

- 有效口径 ≥ 110 mm;
- 焦距:160 \times (1 \pm 0.15) mm;
- 视场角:2 $\omega \geq 12^\circ$;
- 中心波长:650 nm;
- 复消色差谱线 500~800 nm。

3.1.2 CCD 相机

本实验采用美国 Apogee 公司 ALTA 系列 U6 相机,主要参数:

- 靶面规格:1 024 \times 1 024;
- 像元大小:24 μm \times 24 μm ;
- 动态范围: >87 dB;
- 量子效率:72%;
- 工作模式:全帧转移;
- 应用外部触发信号,严格同步曝光触发信号。

3.1.3 精密跟踪架

本实验应用的精密跟踪架有较好的刚度和稳定性,自带角度锁死装置,可以保证多台镜头的视

轴稳定性。为极大避免实验地点周围杂光的影响,本实验不采用跟踪模式采集图像,而是凝视天顶进行图像采集,因此不受到跟踪过程所带来的影响。图 2 为实验室内装调好的实验平台。



图 2 实验平台

Fig. 2 Experiment platform

3.1.4 图像采集程序主要功能

通过主机控制对相机进行初始化,参数设置,并检测相机运行状况;

程序包括:视场监视,单帧采集,多帧采集,数据存储及异常处理功能,多视窗图像对比,单视窗精确查看,工作界面如图 3 所示:

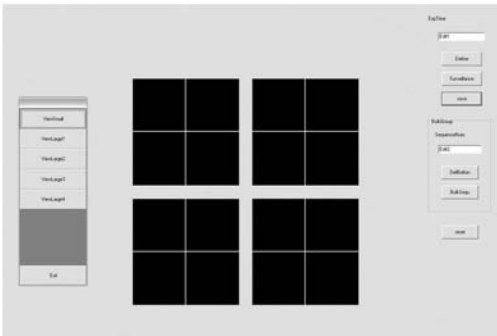


图 3 软件界面

Fig. 3 Software interface

4 实验过程及事后处理

4.1 图像采集

选择晚间 18~22 时,无月亮影响时观测,但仍不可避免存在其他杂光;观测区域为天顶,曝光时间从 $1 \mu\text{s} \sim 1 \text{s}$ 均匀变化;每次采集图像帧数 ≥ 10 ;4 个镜头被刚性固定保证视轴的平行、靶面的平行;曝光时采用同步外触发信号。

4.2 图像事后处理

由于各个镜头位置存在间距,使得采集图像的视场有一定的差异,所以需要采集图像进行必要的图像配准,包括平移、旋转、尺度变换。配准过程中需要对图像部分像元的灰度值进行必要的插值(双三次插值)处理,最终仅保留各个图像视场中的交集数据。匹配叠加前后的图像见图 4、图 5。

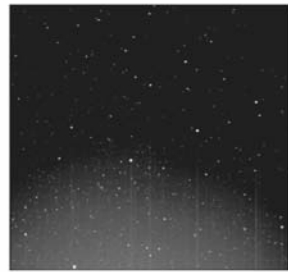
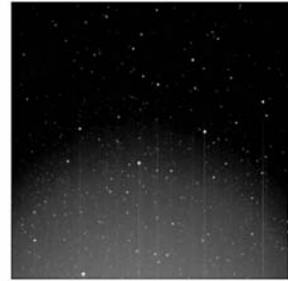
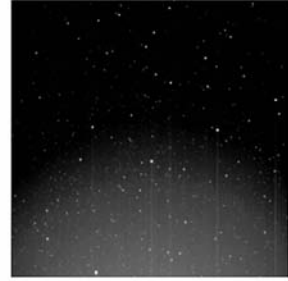


图 4 4 个孔径采集的图像(曝光时间 1 s)

Fig. 4 Images of four apertures ($t=1 \text{ s}$)



图 5 多孔径叠加后的图像(曝光时间 1 s)

Fig. 5 Stacking image of multi-aperture ($t=1$ s)

5 实验结果及分析

本实验采取不同曝光时间综合统计的方法,对于不同曝光时间的图像分别计算叠加前各帧图像的信噪比及叠加后图像的信噪比,计算二者比值的平均值,最终给出信噪比的提升程度。计算时,在不同曝光时间的各帧图像中随机挑取 40 个星点作为统计目标。为避免饱和点,所选取的目标大多集中在整幅图像的上部。在统计计算时,不同曝光时间采集的图像所选择的目标是不同的。表 2 为部分实验数据。

表 2 部分实验数据

Tab. 2 Partial experiment data

	SNR	T_1	T_2	T_3	T_4
1 s	Combined	21.857	20.891	45.171	11.714
	Camera1	20.223	13.725	23.411	7.401
	Camera2	14.212	13.181	20.477	7.303 8
	Camera3	11.437	12.201	23.526	7.9016
	Camera4	18.467	16.669	25.401	7.756
100 ms	SNR	T_1	T_2	T_3	T_4
	Combined	13.292	20.616	11.554	38.785
	Camera1	6.835 8	17.196	12.303	24.016
	Camera2	7.444 2	13.474	9.274 2	12.062
	Camera3	5.639 4	20.914	6.266	21.214
Camera4	7.682 4	15.464	11.537	29.12	
10ms	SNR	T_1	T_2	T_3	T_4
	Combined	11.414	8.651 2	21.032	16.384
	Camera1	7.031	5.810 8	18.525	15.571
	Camera2	8.186 6	4.562 4	14.296	18.784
	Camera3	6.063 2	5.716 2	15.316	14.597
Camera4	7.928 6	6.012 2	22.751	15.601	

	SNR	T_1	T_2	T_3	T_4
1 ms	Combined	20.827	9.176 8	23.468	9.470 6
	Camera1	16.229	5.330 8	20.96	7.454
	Camera2	13.088	5.983 6	16.618	6.104
	Camera3	11.296	6.809	16.354	5.944 6
	Camera4	15.433	4.846 4	20.951	7.458 8
100 μ s	SNR	T_1	T_2	T_3	T_4
	Combined	22.27	23.194	19.451	6.981 2
	Camera1	19.399	18.632	12.473	4.580 4
	Camera2	15.19	19.865	11.706	3.756 2
	Camera3	13.13	17.216	9.536 2	4.248 2
Camera4	15.685	20.373	10.298	4.210 6	

根据不同曝光时间下采集的图像,分别计算叠加后和叠加前信噪比的比值,再进行平均计算,得出最终提高倍数为:1.58。统计结果如图 6 所示。

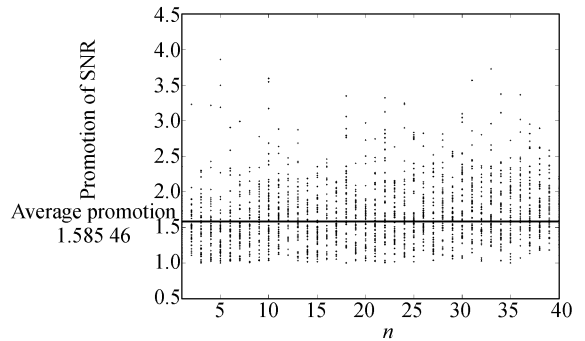


图 6 信噪比提高程度分布图

Fig. 6 Distribution diagram of SNR promotion

对上述结果有几点分析说明:

首先,在将各帧图像进行叠加时,每幅图像灰度数据的存储为 0~655 35,对于长时间积分的情况,每帧图像中已经有饱和像元,4 幅图像叠加后的图像灰度为 0~262 140。为了显示,必须对其进行存储范围的比例变换。本次实验计算信噪比所应用的图像数据并未进行比例变换,而是直接存储为 32 bit/pixel。另外,在图像匹配的过程中由于存在几何变换,要进行必要的灰度值插值,这样会使极少部分像素值存在偏差,有的偏大,有的偏小。最终在数据统计时所选取的目标均为叠加前后灰度值不失真的,所以不会影响统计计算的结果。

其次,实验时由于存在环境杂光,且 CCD 相机为全帧转移工作模式,所采集的图像背景灰度值较高,对计算结果有一定程度影响。如果更换

较好相机,并选取远离市区的地点进行观测,那么信噪比提高幅度可以进一步增加。

最后,利用像素灰度值的计算,进一步得出结论,此实验系统与单孔径的探测系统相比其探测能力有所增加,近似提高0.5个星等。

6 结 论

本实验对“捆绑式望远镜”图像信噪比的提高程度进行了验证,因为背景的随机噪声在短时间内不呈饱和状态,所以通过4帧同时曝光的图

像进行叠加可以有效地抑制其影响,显著提高图像信噪比,且各单帧图像不易出现饱和现象。经过图像数据的计算得到统计结果:4帧图像叠加后的图像信噪比平均为单帧图像信噪比的1.58倍,探测能力近似提高0.5个星等。此外,应用图像叠加技术,捆绑式望远镜与单孔径望远镜相比,不但提高了的探测能力,还保持了其合成图像的对应焦距并不缩小。这在保持探测视场不减少和提高空间碎片探测能力方面更显示出独特的优越性。

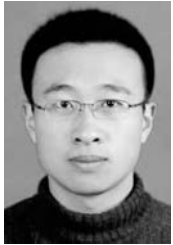
参考文献:

- [1] 程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 北京:中国科学技术出版社,2003:16.
CHENG J Q. *Principles of Astronomical Telescope Design* [M]. Beijing :China Science & Technology Press, 2003:16. (in Chinese)
- [2] BECKERS J, ULICH B, WILLIAMS J, *et al.*. Performance of the multiple mirror telescope (MMT): I [J]. *SPIE*, 1982, 332: 2-8.
- [3] JACQUES M, WILLIAMS J. Performance of the multiple mirror telescope (MMT): III [J]. *SPIE*,

1982, 332: 16-23.

- [4] GORING W, GILMORE D, MCCLAIN D, *et al.*. Performance of the multiple mirror telescope (MMT): IV [J]. *SPIE*, 1982, 332: 24-32.
- [5] KAISER N, AUSSEL H, BURKE B, *et al.*. Pan-starrs — a large synoptic survey telescope array [J]. *SPIE*, 2002, 4836: 154-164.
- [6] KAISER N. Pan-starrs — a wide-field optical survey telescope array [J]. *SPIE*, 2004, 5489: 11-22.
- [7] ANDREWS H C, HUNT B R. *Digital Image Restoration* [M]. USA: Prentice-Hall, 1977. 22.

作者简介:



王鸣浩(1981—),男,吉林长春人,博士研究生,主要研究方向为地基大口径望远镜图像处理。E-mail: wpau1007@163.com



王建立(1971—),男,山东曲阜人,研究员,博士生导师,主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像光电望远镜总体技术的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn

导师简介:



陈涛(1965—),男,内蒙古赤峰人,研究员,主要研究方向为电精密跟踪测量技术的研究。E-mail: chent@ciomp.ac.cn



刘欣悦(1973—),男,辽宁大连人,副研究员,主要研究方向为数字图像处理。E-mail: sirliuxy@sina.com