

文章编号: 0253-2239(2002)09-1109-07

光学综合孔径望远镜阵的光束组合器^{*}

王海涛 周必方

(中国科学院国家天文台 南京天文光学技术研究所, 南京 210042)

摘要: 光束组合器是光学综合孔径望远镜阵重要技术组成部分之一。从光束组合器所产生的光干涉条纹中提取中央条纹(主峰)相位和可见度信息,实现对望远镜状态、延迟线光程补偿与条纹跟踪,光束平行性伺服等进行精细反馈控,从而高灵敏度、高效率地得到图像重构的闭合相位等数据,最后获取高分辨率的目标图像。给出了一个用于光学综合孔径望远镜阵像面光束组合器方案的初步研究结果。

关键词: 干涉条纹;望远镜阵;光束组合器;相位闭合

中图分类号: TH751 文献标识码: A

1 引 言

1.1 光学综合孔径望远镜阵结构组成与图像重构

光学综合孔径望远镜阵是高分辨率天文目标成像观测的新手段^[1-3],其结构原理如图 1 所示。通常一个光学综合孔径望远镜阵是由六个主要部分组成:1)子望远镜子系统,2)光程补偿延迟线子系统,3)各子望远镜光束平行性伺服子系统,4)光束组合器子系统(含干涉条纹信息提取与数据处理技术),5)图像重构子系统,6)计算机控制子系统。

光学综合孔径望远镜阵是由若干个子望远镜组成阵列(至少三个,图 1 是我们研究的六个子望远镜组成的阵)。每两个子望远镜形成一条基线,每条基线的两子望远镜的两束光在光束组合器中相干形成一组与基线相垂直的干涉条纹。如果所有基线方向与长度均不相同称为非冗余度阵,否则称为冗余度阵,本文研究的是非冗余度阵。子望远镜数目为 N ,基线数为 $N(N-1)/2$,因此,在我们研究的六个子望远镜组成的光学综合孔径阵中就有 15 条基线。每一条基线的两个子望远镜在光束组合器中均产生一组明暗相间的干涉条纹,15 条基线就有 15 组干涉条纹,在组合器像面处就获得了这 15 组条纹的合成条纹的复杂花样。而且其间每组一定有峰值最大的中央条纹。光学综合孔径成像就是要从光束组合器所获得高质量的许多组干涉条纹中提取每条基线干

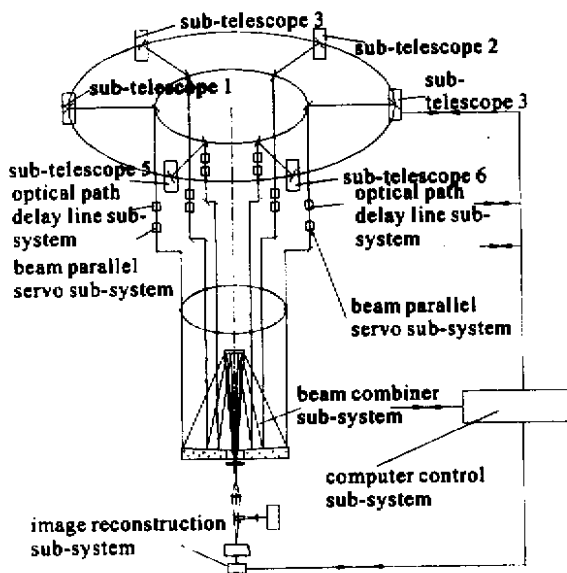


Fig. 1 Schematic configuration of optical synthetic telescope array

涉条纹的幅度和相位,并借鉴射电天文所采用的闭合相位法就可得到待测目标光强度分布傅里叶分量中的相位^[4]。由于我们采用六个非冗余度阵,15 个相对应的待测目标的傅里叶分量的相位可以全部独立解出,得到了 15 条基线的待测目标傅里叶分量的相位和模。再加上地球的自转又可以获得十分好的空间频率覆盖,最后通过傅里叶逆变换就可很好地实现天体二维像的重构。

如果从光束组合器尚未提取到高质量的每组干涉条纹,即每组条纹的中央条纹位置和幅度未达到要求,这时就由条纹探测器通过计算机控制子系统发出反馈的信号,对子望远镜、延迟线、光束平行性

^{*} 中国科学院重点项目基金、中国科学院空基综合信息网基金、863-2 基金资助课题。

E-mail: htwang@mail.nairc.ac.cn

收稿日期: 2001-11-12; 收到修改稿日期: 2002-02-15

伺服子系统给出指令,让它们的状态作调整,一直到从光束组合器提取到高质量的每级干涉条纹为止,并紧接着输送到像重构子系统进行傅里叶逆变换等,从而获得天体二维图像。以上过程均要实现闭环和联锁的控制。

光束组合器在所有的地基和空基光学综合孔径望远镜阵的后端,有两种基本不同的类型。一种称像面光束组合器,另一种称瞳面光束组合器⁵¹。原则上,一个理想的仪器(指没有噪声的探测器),从这两种类型所得到的信噪比相同。

1.2 像面光束组合器及其干涉术

一般的像面光束组合器的干涉仪示于图 2。两孔径对准天空的同一目标,两个像被叠加在一起,干涉条纹产生在单一的组合器像面上,也称为菲索(Fizeau)干涉术。而孔径光束到达像面的光程差为:

$$\Delta Z = Z_{ext} - Z_{int}, \quad (1)$$

两孔径光束的相位差为:

$$\Phi = 2\pi\Delta Z/\lambda = 2\pi(Z_{ext} - Z_{int})/\lambda, \quad (2)$$

在地球自转时, Z_{int} (延迟线所补偿的内光程差)要连续调整,保持 ΔZ 接近于零。

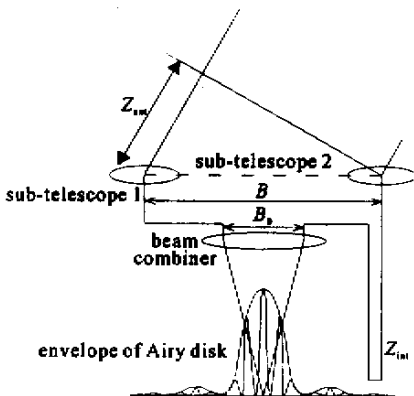


Fig.2 Schematic of the image beam combiner style

在像面上所获得的干涉条纹强度是它在像面上角位置 θ 的函数,由下式给出:

$$I_{int}(\theta) = 2I_{tel}(\theta) \{1 + V \cos[2\pi(\theta B_0 + \Delta Z)/\lambda]\}, \quad (3)$$

其中, I_{tel} 是包络形成的强度分布(单个子望远镜艾里斑强度分布), V 是天体目标(如恒星)的可见度, B_0 是组合器的基线长度, θB_0 是干涉条纹的调制项, ΔZ 是干涉条纹的位置项。

适当的放大装置和一个多像素探测器如 CCD 可用于探测干涉条纹。

当延迟线调整到 $\Delta Z = 0$ 的光程差,那么条纹花样的峰值(中央条纹)被对准包络的中央。如果延迟线偏离零光程差的位置,包络仍不动,但条纹将横过包

络移动。由于采用一个有限的带宽或多个窄的带宽,在非零光程差时不同的波长的条纹峰值(中央条纹)将不重合,当光程差过大时,条纹变得完全模糊不清。

1.3 瞳面光束组合器及其干涉术

瞳面组合器的干涉仪如图 3 所示。瞳面组合器是将两个孔径平行光束叠加在一个半反半透的光束分束器 BS 上,两束合成的输出光束被聚集在单像素的探测器上(如雪崩光电二极管)。它也称为迈克尔逊(Michelson)干涉术。在瞳面干涉中组合光束是完全重叠,所以组合器的基线长度是 0,即 $B_0 = 0$,延迟线补偿与上述的一样。

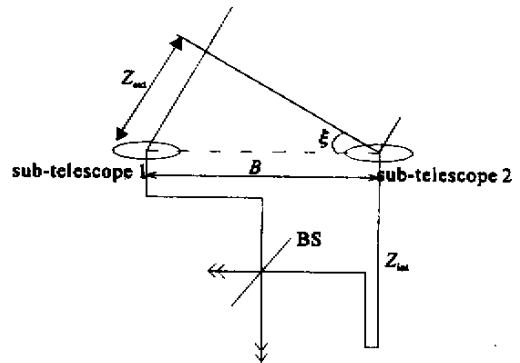


Fig.3 Schematic of the pupil beam combiner style

如果光程差被调整到零,那么对称的重叠光束出现于光束分束器的每一边,而且有相等的强度,因为每一边均是反射和透射光束的和。光束分束器的透射和反射光束的相位差精确地等于 $\pi/2$ 。那么,在组合光束之间的相位差为

$$\Phi = 2\pi\Delta Z/\lambda \pm \pi/2, \quad (4)$$

其中 ΔZ 如(1)式定义,附加的 $\pm \pi/2$ 即为光束分束器的相移。

因为 $\pi/2$ 的相移项改变了上述干涉条纹强度,表达式中余弦项($+$ \cos)变成正负正弦项(\pm \sin)。因此随着光程差变化,组合光束强度也跟着具有相反符号的变化,由下式给出:

$$I_{int}(t) = 2I_{tel} \{1 \pm V \sin[2\pi\Delta Z(t)/\lambda]\}, \quad (5)$$

其中 I_{tel} 是在焦平面上对角的积分,即:

$$I_{tel} = \int I_{tel}(\theta) d\theta,$$

相位差被时间调制,而不是如像面组合器干涉术那样被空间调制。如果时间调制是一个三角形波或斜坡函数,那么在调制周期部分 $\Delta Z(t) = u(t)$,测量时间调制信号的幅度可直接给出可见度 V 。

如果采用有限的光谱带宽,那么正如像面组合器干涉术一样,光程差被调整到非零状态,不同波长的

条纹峰值将不可能达到完全的重叠,条纹会变模糊。

2 两种光束组合器技术的分析

光学综合孔径望远镜阵图像重构是立足于光学综合孔径望远镜阵的子望远镜两两相干的基础上的,不管是采用像面组合器还是瞳面组合器,均需满足子望远镜两两相干的要求。一般来说,前者与子望远镜数目的多少无关,均可采用单一的望远镜结构形式作综合式像面组合器。与之完全不同,后者几乎均采用多个光束分束器结构的形式作分离式瞳面组合器。光束分束器的数目取决于非冗余基线数目。

我们研究的是六光束非冗余的二维阵,六个子望远镜光束在瞳面上的安排如图 4 所示。六个等口径的望远镜分布在一个对应于要求的系统最高频率的圆周上,即其中有一对子望远镜组成的基线(距离)等于该圆周直径。另有一对子望远镜组成的基线(距离)等于子望远镜的直径,对应于系统最低频率。这就意味着可得到尽可能大的空间频率覆盖。

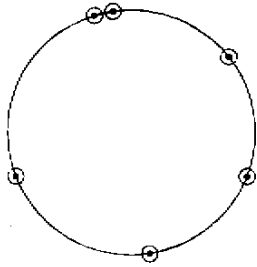


Fig. 4 An example array of two-dimension non-redundant aperture position

当采用像面组合器时,光束从六个子望远镜组合到单一望远镜式组合器像面处的一个探测器上。为了使对应于不同基线的条纹分开,必须施加不同的空间调制于每条基线上。而且在组合前延迟线的调制必须施加于从每一个子望远镜进来的光束上并进行编码。如果调制采用一个分段的线性波形,那么数据的译码(判读)是容易的和所得到的信噪比是最高的。在探测器上调制成正弦变化的信号并且能采用傅里叶变换进行分析以及分段到使最大的延迟仍在允许的范围(即子望远镜的艾里斑包络)内。所有的延迟线的调制应是相同的频率,但有不同的幅度。某一基线条纹频率对应于构成基线的两个子望远镜调制幅度的差。如果调制时间是 T 和构成基线的两个子望远镜调制幅度差为 k 个波长,那么条纹频率是 $f = k/T$, 应选取调制幅度,使所有的条纹频率不相同。

我们也考虑过瞳面组合器。这种组合器采用时

间调制,是一个简单的两路光束组合器。由两个子望远镜光束进入光束分束器,被组合在光束分束器的表面处。两个组合光束分别由两个探测器 A 和 B 采集,如图 5 所示。由两个探测器 A、B 所探测到的光束强度记录为 a 、 b 。如果没有条纹出现,那么 $(a - b)$ 平均于 0 和有相同的噪声 ($a = b$),如果有一组条纹出现,那么光束分束器的一边比另一边将有较高的信号。哪一边高将取决于条纹的相位。当条纹相位变化时随着可见度幅度增加 ($a - b$) 起伏也将增加,但 $(a + b)$ 起伏不改变。可见度振幅可由下式决定:

$$V^2 = \frac{(a - b)^2}{(a + b)^2}, \quad (6)$$

因为在光束分束器处的两光束间隔为 0,因此条纹频率也是 0,当相位改变时,组合光束的像不改变形式。整个像的亮度要发生变化,像虽产生在光束分束器两边,但它的总能量仍保持不变,当一边像的高度增加时,另一边就会减弱。为满足条纹的探测要求,延迟调制的速度要比由大气引起的条纹运动速度快。探测器的输出要与调制同步,信号与时间成正弦变化,信号相相位对于调制相位即为条纹相位。

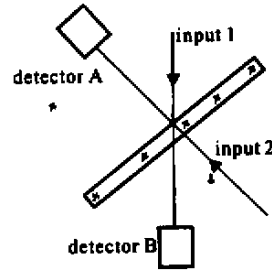


Fig. 5 A beam combiner with two inputs and outputs

与像平面组合器比较,瞳面组合器可采用单一像素的探测器(如雪崩光电二极管),但必须有较快的取样速度。并且每条基线都必须有一个组合器,因而光路复杂,不紧凑,不利于空间应用。

为此本文着重给出像面光束组合器方案。

3 像面光束组合器的光学系统

3.1 成像装置与条纹跟踪装置技术

由六个子望远镜组成的二维非冗余光学综合孔径阵,含 15 条基线,其光束组合器应有光束输入装置,条纹跟踪装置、倾斜镜装置、准直装置、成像装置等部分组成。本文着重介绍成像装置和条纹跟踪装置。

当红外和可见光在光束输入装置中被隔开,六条可见光光束进入光束组合器。可见光成像装置^[6],即可提供闭合算法求目标强度分布傅里叶分量的条纹和相位,包含两个功能,其一,测量可见度

大小,其二,测量条纹相位。它的运行模式有:获取长时间取样的可见度大小和闭合相位,短时间取样的可见度大小和闭合相位,仅仅可见度大小。

为了实现闭合相位或是简单的可见度大小测量,对阵的不同延迟线之间等光程值必须控制在远小于条纹的艾里斑包络,保持所有基线的光程差均在条纹干涉长度之内。对于短基线比较容易实现,对长基线是很困难的。条纹跟踪就是从每一基线的误差信号判别光程差是否在条纹的艾里斑包络之内。判别其离开多远和方向。因此,条纹跟踪装置在光束组合器内是与成像装置隔开的,是一个独立的装置。这样两者可以分别优化。条纹跟踪装置为了锁住条纹可以采用宽的光谱带宽和较短的取样时间。而成像装置则采用较长的取样时间,较窄的光谱带宽和高的光谱色散。

条纹跟踪装置采用群延迟跟踪技术。如果在没有或最小剩余相位差和波面倾斜时两个光束被组合,那么,色散光谱将成为条纹信道,那些条纹将垂直于色散方向,而且对波数等间隔。

在探测器上合成条纹花样由下面简化式子给出:

$$I(\nu) = I_s [1 + |V(\nu)| \cos(2\pi\Delta Z - \phi)] + I_b \quad (7)$$

式中, ν 是波数, I_s 是未调制的恒星光谱的强度, ΔZ 是光程差或延迟量, $|V(\nu)|$ 是与波数有关系的条纹可见度大小, ϕ 是可见度相位, I_b 是背景强度。

当波数取常数,改变光程差可观测到条纹。同样,光程差不变,改变波数也可观测到条纹。那些横向条纹(每一等色项)称为信道条纹和信道光谱的合成光谱。随着光程差或延迟增加,给定带宽的信道数目也要增加,因此,只要对给定带宽的条纹进行计数,就能测出光程差或延迟,其关系为:

$$n = \nu_{\max} \Delta Z - \nu_{\min} \Delta Z \quad (8)$$

$$\Delta Z = n(\nu_{\max} - \nu_{\min}) \quad (9)$$

因此,从(9)式中可知,光程差是给定带宽条纹数的线性函数,测量 n 的一个有效和简单的方法是测量条纹频率,也就是每单位波数的条纹数。如果在一个波数内取样的像素是等间隔的,信道光谱的傅里叶变化包含零频分量,对应于帧中的整个强度,沿着峰值,一个峰对应于一个条纹频率,因此应采用多像素面阵作探测器。

3.2 光学系统方案

图6给出了一个二维非冗余的六个子望远镜阵的像面光束组合器光学系统方案。为了避免聚焦望远镜式组合器口径过于增大,要适当地选取光束宽度。

光束宽度由仪器安装地点的大气扰动情况确定。1"级的大气扰动,大气相干长度为 10 cm ~ 14 cm。聚焦望远镜口径在 1m 量级以内(如果六个子望远镜阵采用一维排列,那么,聚焦望远镜还要大得多)。用一个聚焦望远镜即可实现所有的 15 个基线,所有相位闭合同时使用,而且所有光束均经相同数目的反射。

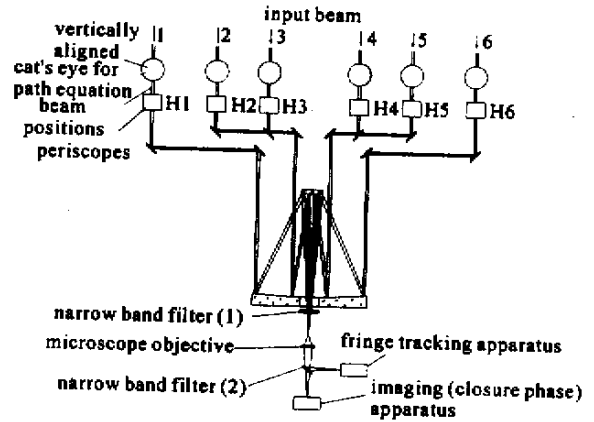


Fig.6 An image beam combiner optical system used in two-dimension non-redundant 6 sub-telescope array

图中潜望镜和反射镜是用来重新排列输入的光束使它们在瞳面成二维排列,如图4所示。

由于使用二维的探测器进行条纹编码,就不能采用象一维那样的光谱色散方案。因此,在系统中要加入一个窄带滤波器以减少系统的光谱带宽。

4 像面光束组合器的模拟

4.1 计算机模拟

为简化起见,子望远镜在系统瞳面上的排列如图7所示。假如有 N 个子望远镜分布在半径为 r 的圆周上,在聚焦望远镜像平面有任一点 (x, y) ,对于第 i 个光束,它的电场为:

$$E_i(x, y) = E_0 \cos[2\pi(s_x^2 + s_y^2)^{1/2} \cos(\phi - \phi_0)] \quad (10)$$

E_0 为单位波面发生的次波在聚焦望远镜中心点的电场, s_x 和 s_y 是无量纲量,

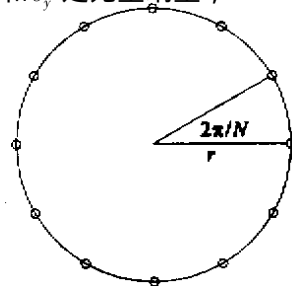


Fig.7 N apertures interferometer located on a circle

$$s_x = rx/\lambda f, \quad s_y = ry/\lambda f, \quad (11)$$

式中 λ 为光波长, f 为聚焦望远镜的焦距, ϕ 与 ϕ_0 为方位角

$$\phi = \arcsin[s_y (s_x^2 + s_y^2)^{1/2}], \quad (12)$$

$$\phi_0 = 2\pi i/N, \quad (13)$$

因此,总电场是:

$$E_{\text{tot}}(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} E_i, \quad (14)$$

因此强度为:

$$I(x, y) = [E_{\text{tot}}(x, y)]^2. \quad (15)$$

在 (14) 式中的总和可以用贝塞尔和展开式表示^[7], 可概括为,一次观测有:

$$\left. \begin{aligned} (s_x^2 + s_y^2)^{1/2} &\ll 1/N, \\ I(x, y) &\propto J_0^2[2\pi(s_x^2 + s_y^2)^{1/2}]. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

强度分布 $I(s_x, s_y)$ 可由 $I(x, y)$ 导出,用计算机即可进行模拟.图 8 分别给出波长 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, 子孔径为 $N = 2, 4, 6$ 的由计算机模拟的在像面光束组合器的聚焦望远镜像平面处干涉条纹花样.

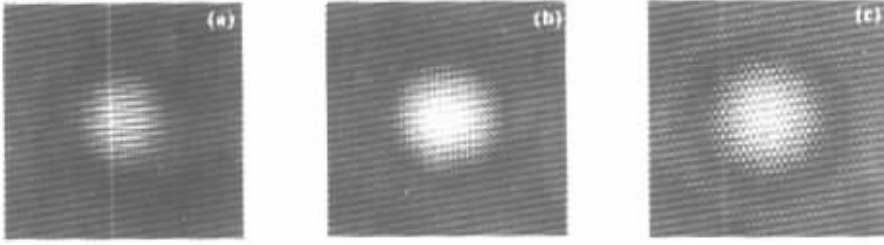


Fig.8 Interferogram simulated by computer with N apertures, where $N = 2, 4, 6$. (a) Interferogram with 2 apertures; (b) Interferogram with 4 apertures; (c) Interferogram with 6 apertures

4.2 实验室试验模拟

为了验证计算机模拟的干涉条纹花样正确与否,我们采用如图 9 所示的一种试验装置,进行了模拟多子孔径综合孔径阵干涉条纹花样.

试验中如果用激光作光源,图 9 中滤光片不必插入,若用白光光源可用上绿光区域、10 nm 带宽的滤光片.光源出来要经过针孔光阑滤波.孔径掩模板上的小孔直径为 1.5 mm, 三块分别有 $N = 2, 4, 6$

数目小孔的掩模板可以互换插入光路.这些小孔可等间隔也可不等间隔地分布在 $\phi 30 \text{ mm}$ 的圆周上,模拟子望远镜的孔径.从光源发出的光束经过掩模板上的子孔径在聚焦望远镜像面处相干涉,产生干涉条纹花样,又经 10 倍显微镜镜头放大后被 CCD 相机所接收.

图 10 给出了用激光光源试验的模拟干涉条纹花样.与计算机模拟干涉条纹花样基本一致.

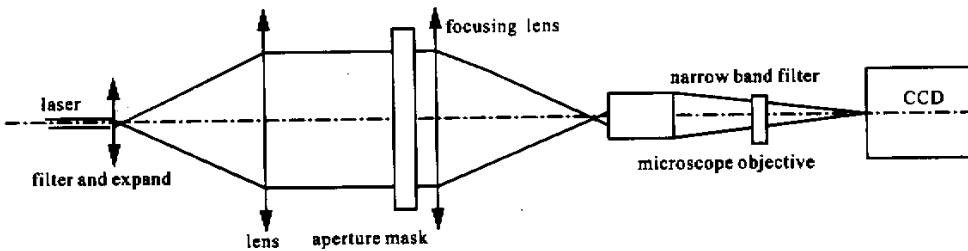


Fig.9 Schematic configuration of laboratory simulation experiment apparatus

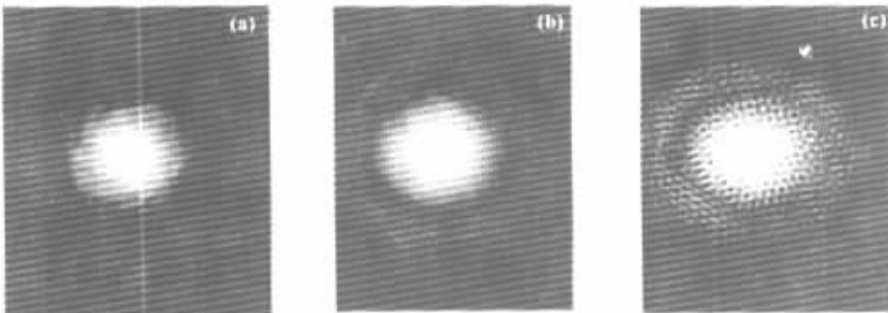


Fig.10 Interferograms given by experiment. (a) Interferogram by 2 apertures; (b) Interferograms by 4 apertures; (c) Interferogram by 6 apertures

5 干涉条纹信息提取与数据处理

在上述掩模板试验基础上对干涉条纹信息提取与数据处理技术进行了研究。

像面组合器的干涉条纹采用空间频率进行编码,每一个光谱信道的傅里叶变换包含了对应于每一个基线的峰值。如果成像系统结构的几何关系能精确知道,那么在傅里叶变换中对应于每一个基线的每一个峰值位置可预先知道。实际情况不是这样。只有在许多帧的功率谱求和后才能得到峰值的位置。至于每一个峰值大小和相位可由傅里叶变换

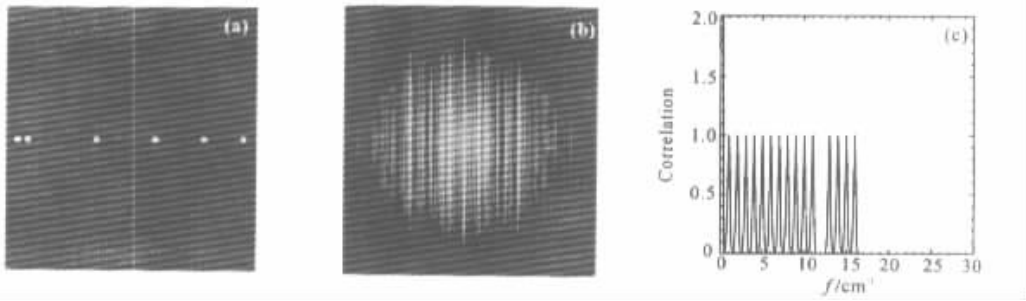


Fig. 11 Fringe pattern measured by imaging style combiner. (a) The one dimension 6 beam nonredundant pattern; (b) Fringe pattern; (c) Spatial fringe frequency

在这些试验中探测器运行于视频速率,所以可利用的最短的取样时间是 30 ms。这个时间比大气扰动时间长得多了。

功率谱仅仅用于确定峰值的位置。一旦那些位置已知,那么,每一帧的峰的大小和相位闭合可以取平均,并作一次测量。

我们也探讨了孔径掩模的数值模拟,为了得到光通量特性的量的概念,至少要求每帧每孔径有 3 个光子才能进行相位闭合的测量。如果仅仅用于可见度大小的测量,那么每帧每孔径的光子数可降至 2。但这些模拟不包含所使用的探测器的读出噪声。如果要克服探测器读出噪声的影响,每帧应当收集更多些的光子数,对这个模拟工作还要继续进行。

结论 本文对光学综合孔径望远镜阵光束组合器有关技术尤其着重于像面光束组合器的技术作了先期跟踪研究,给出了一种像面光束组合器光学系统方案,并进行了计算机模拟和实验室试验模拟。干涉条纹信息提取和数据处理的模拟。为光学综合孔径望远镜阵技术研究和开发工作奠定了基础。

这项工作得到 863-2(微小卫星技术组)专家林

直接计算出。因此,相位闭合和可见度大小也就获得。如果单帧的信噪比太小,那么峰值高度和相位闭合可通过多帧求平均值。

图 11(a)是一维排列的六子孔径掩模,图 11(b)是 11(a)的六光束非冗余阵的合成干涉条纹花样,它垂直方向被压缩,而且在探测器组件中,能呈现每一个光谱信道的合成干涉条纹花样。图 11(c)给出了干涉条纹功率谱,每峰值代表每对孔径。有 15 个基线(15 对孔径)被分别表示出。由于阵的孔径间隔的原因,有些空间频率的条纹丢失了。

来兴教授等的支持与帮助,又蒙黄欣晟同志为本文的文字输入、作图和排版。向他们一并表示谢意。

参 考 文 献

- [1] Zhao Peiqian, Zhou Bifang, Lena P *et al.*. Method study of optical path modulation in coherent optical telescope array. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1994, **14**(7):784 ~ 751 (in Chinese)
- [2] Zhou Bifang, Zhao Peiqian. Study of a large optical/IR telescope Scheme. *Acta Astronomica Sinica* (天文学报), 1992, **33**(2):212 ~ 219 (in Chinese)
- [3] Zhou Bifang, Mao Weijun. Optical system of stellar interferometer. *Astronomical Instrument and Technology* (天文仪器与技术). 1998 34 ~ 49
- [4] Jennison R C. A phase sensitive interferometer technique for the measurement of the Fourier transforms of spatial brightness distributions of small angular extent. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 1958, **118**(3):276 ~ 284
- [5] Wilhelm R. *Novel Numerical Model for Dynamic Simulation of Optical Stellar Interferometers*. Ph. D Thesis, 2000. Berlin Technical University
- [6] Baldwin J E, Haniff C A, Mackay C D. Closure phase in high resolution optical imaging. *Nature*, 1986, **320**(6063):595 ~ 597
- [7] Liang Quanting. *Physical Optics* (物理光学), Beijing: Mechanical Industry Press, 1980. 101 ~ 112 (in Chinese)

Beam Combiner in Optical Aperture Synthesis Telescope Array

Wang Haitao Zhou Bifang

(*Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology , National Astronomical
Observatories , The Chinese Academy of Sciences , Nanjing 210042*)

(Received 12 November 2001 ; revised 15 February 2002)

Abstract : Beam combiner is the key part of optical aperture synthesis telescope array. From the interferogram produced by beam combiner , the useful messages such as the central fringe phase and visibility can be extracted. With these messages , one can make it into reality to control the telescope status , compensate the path with delay lines , track fringes , beam parallel character feed back and fine control so as to get enough data used for closure phase calculating and image reconstruction. An initial result on the beam combiner for optical aperture synthesis telescope array is presented.

Key words : interference fringe ; telescope array ; beam combiner ; closure phase