

文章编号 1004924X(2002)05043409

光学综合孔径干涉成像技术

王海涛, 周必方

(国家天文台 南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042)

摘要: 闭合相位技术、U_V 覆盖技术和像重构技术是光学综合孔径干涉成像的三个关键技术。文中详细介绍了闭合相位技术的原理、U_V 覆盖技术(包括即时覆盖和通过孔径旋转的非即时覆盖两种方法)和用于图像重构的常用方法以及用于光学综合孔径像重构的混合迭代方法, 最后讨论了光学综合孔径干涉成像技术的应用。

关键词: 光干涉; 光学综合孔径; 图像重构; 闭合相位; U_V 覆盖

中图分类号: O436.1 **文献标识码:** A

1 引言

光学成像原理可分为三大类, 一类是几何光学、像差理论成像原理, 通常的光学系统设计按此理论基础进行的; 一类是衍射成像原理, 它以波动光学的衍射理论为基础, 结合通信理论中线性系统的方法, 把成像系统视为空不变的线性系统, 成像系统的特性用相干传递函数(相干照明)或光学传递函数(非相干照明)来描述, 衍射成像原理在像质定量评价和成像系统分辨率的研究以及实现高分辨率成像等方面起了重要的作用; 另一类成像理论是干涉成像原理, 它认为成像过程本质上是干涉过程^[1], 像面上任何一点的光扰动必然是出瞳上各点光扰动贡献的叠加, 干涉成像原理以光场的部分相干性为基点。这是实践中普遍存在的光场, 部分相干性的成像特性有着不可忽视的影响。因此, 衍射成像原理中被截然分开的相干成像和非相干成像就作为两个极限情形被包括在干涉成像原理之中, 因此干涉成像原理更有普遍性。本文从干涉成像原理出发, 介绍光学综合孔径干涉成像原理, 光学综合孔径干涉成像技术所用到的三个关键技术: 闭合相位技术、U_V 覆盖技术和像重构技术是光学综合孔径干涉成像, 讨

论光学综合孔径干涉成像技术在天文学和空间碎片观测应用的可能性。

2 光学综合孔径成像原理

图1中 N_G , x_y , u_v 分别为物、出瞳和像平面, 由 Van Cittert-Zernike(范西特-泽尼克)定理, 光强分布为 $I(N_G)$ 的非相干源在距离 Z 处的平面上(如出瞳)任意的点 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 处形成的互强度, $J(x_1, y_1; x_2, y_2)$ 。含 $v_x = x_2 - x_1$, $v_y = y_2 - y_1$, 并注意在 (N_G) 在一定的光源范围 2 之外时, $I(N_G)$ 等于零, 可得到范西特-泽尼克定理的最后形式为:

$$J(x_1, y_1; x_2, y_2) = \frac{K \epsilon^{jW}}{(KZ)^2} \iint_Q$$

$$I(N_G) \exp\{j \frac{2P}{KZ} (\$x_N + \$y_G)\} dN dG$$

式中位相因子 W 由下式给出:

$$W = \frac{P}{KZ} [(x_2^2 + y_2^2) - (x_1^2 + y_1^2)] = \frac{P}{KZ} (Q_2^2 - Q_1^2), \quad (1)$$

其中, K 为平均波长, Q 和 Q 分别表示点 (x_2, y_2) 和点 (x_1, y_1) 离开光轴的距离。

为方便起见, 这个定理常常被写成规范化形式, 复相干因子写成:

收稿日期: 20020217; 修订日期: 20020926

基金项目: 中国科学院重点项目基金, 863 基金资助课题

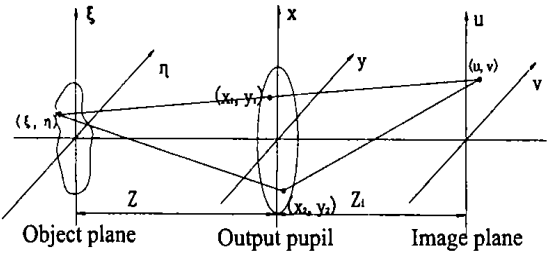


图 1 干涉成像模型

Fig. 1 The model of interference imaging.

$$L(x_1, y_1; x_2, y_2) = \frac{e^{-jW} \iint_Q I(N, G) \exp\{j \frac{2P}{KZ} (\$x_N + \$y_G)\} dN dG}{\iint_Q I(N, G) dN dG}, \tag{2}$$

式中位相因子 W 同(1)式。

从上式中, 复相干因子等于光源强度函数的归一化傅立叶变换。

$|L(x_1, y_1; x_2, y_2)|$ 表示条纹的可见度。

由互强度和复相干因子的定义:

$$J_{12} = \#_{12}(0) = \langle L(p_1, t) L^*(p_2, t) \rangle, \tag{3}$$

$$L_{12} = \frac{J_{12}}{[I(Q) I(Q)]^{\frac{1}{2}}}, \tag{4}$$

式中, $L(p, t)$ 为在点 Q 时间 t 的随机光场的复解析信号, $\#_{12}(S)$ 为光场的统计互相关函数, 因此, J_{12} 或 L_{12} 描述了光场的统计的空间相关性, 即空间相关性。

由杨氏干涉实验知, 在出瞳内矢量间距 (v_x, v_y) 的一对针孔在距离 Z_i 处的像面上形成的条纹和强度分布为:

$$I(u, v) = I^{(1)} + I^{(2)} + 2 \sqrt{I^{(1)} I^{(2)}} |L_{12}| \cos\left[\frac{2P}{KZ_i} (\$xu + \$yv) + U_{12}\right], \tag{5}$$

式中的 L_{12} 就是(4)式表示的复相干因子。在大多数涉及到非相干源的实际应用中, 有良好的近似, $I^{(1)} = I^{(2)}$, 因此 $|L_{12}|$ 就是杨氏实验条纹的可见度。条纹的空间频率为:

$$(T_u, T_v) = \frac{1}{KZ_i} (\$x, \$y), \tag{6}$$

以单孔径望远镜的出瞳来说, 可把它看成大量/ 针孔0的集合, 单孔径望远镜所成的像, 可看成出瞳面内的所有可能的/ 针孔对0在像面上产生的大量正弦条纹的叠加。像强度频谱中空间频率 (T_u, T_v) 的频率分量必定是在出瞳上, 至少有一对矢量间距为 $(v_x = KZ_i T_u, v_y = KZ_i T_v)$ 的/ 针孔对0所产生。因此像的空间频率与出瞳面内的/ 针孔对0间距建立了对应关系, 这就是光干涉成像的原理。

如果把上述出瞳面上各/ 针孔0视为直径有一定大小的子孔径, 在像面处的成像就可称为综合孔径成像。如何用小孔径系统来达到单个大孔径的分辨本领, 这就是综合孔径成像的目的。不过, 小孔径直径大小的确定受大气扰动所限制。目标经过出瞳面上一定大小的子孔径, 在像面上形成含有目标傅立叶相位和振幅的干涉条纹。从干涉条纹中提取出其相位和振幅(含采用闭合相位), 对(2)式作傅立叶逆变换, 就可得到目标的像, 即像重构。

显然, 出瞳面上若有许多矢量间距 $(KZ_i T_u, KZ_i T_v)$ 相同的子孔径对, 它们产生相同的空间频率 (T_u, T_v) 条纹。这种情形可用光学系统的冗余度来描述, 对于无像差的系统, 冗余度能增大测量的信噪比, 但并不提供新的信息(指相位、振幅或可见度等)。当光学系统存在像差或处于非均匀介质时, 冗余度有时是有害的, 因为这时有相同频率的条纹却有不同的相位, 叠加后降低了条纹的反衬度, 从而降低了振幅的测量精度。特别是由于大气折射率的空间和时间的随机起伏, 使天文望远镜的出瞳内矢量间距相同但位置不同的条纹位相起伏严重, 其后果是冗余度越大的出瞳子孔径对形成的条纹变得高度模糊以至无法测量, 这是大气造成天文望远镜分辨率下降的物理原因。在光学综合孔径成像中, 必须设法消除此影响。

上面用干涉法分析了综合孔径成像原理, 介绍了光学综合孔径成像中基线的无冗余情况。现在对光学综合孔径成像的像重构的原理用一个框图(图 2)来加以说明:

图 2 中示出了从观测目标经综合孔径望远镜干涉阵, 得到所有基线合成的干涉条纹, 对干涉条纹处理后得到频域中的部分 u, v 点。若该望远镜阵(图中画出了四个圆圈表示四个望远镜)一次测量不能满足 u, v 覆盖, 则通过增加孔径数目或旋转孔径阵的办法以满足 u, v 覆盖(图示的是孔

径旋转的办法),当观测到的 u_v 点满足对目标信息频域的采样或满足重构图像要求后,采用适当的算法来对观测目标的像重构,得到观测目标的

像。图示中的星星为观测目标,经过光学综合孔径望远镜阵成像系统,得到重构出的像。

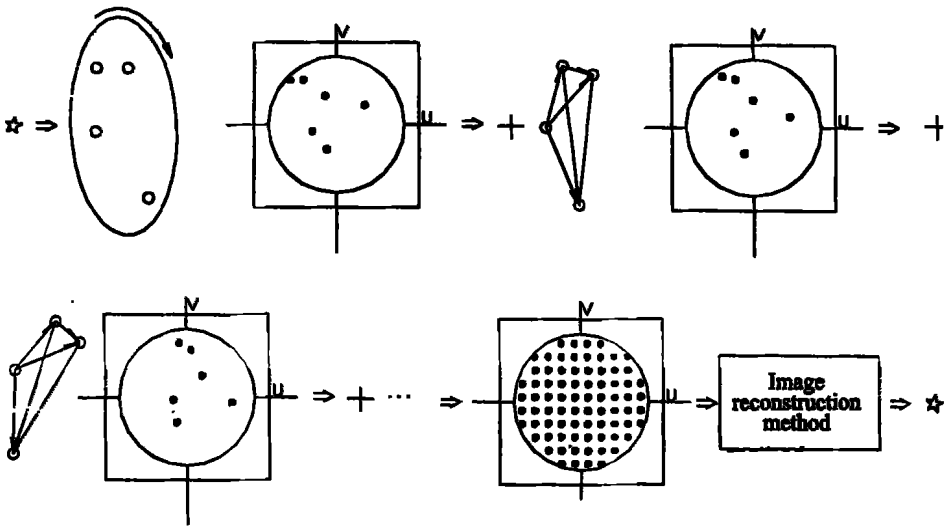


图 2 光学综合孔径成像原理框图

Fig. 2 Sketch map of optical synthesis aperture image theory.

在对从干涉阵得到的干涉条纹进行处理时拟采用闭合相位技术^[23]用以消除由于大气扰动等因素带来的相位误差。计算出目标相对应基线的真实傅立叶相位,对模进行归一化处理得到目标的基线所对应的模,由这些解算出来的相位和模组成观测目标的频率域上的 u_v 点。

3 光学综合孔径成像技术

欲从一个光学综合孔径阵通过上述原理,得到好的干涉条纹,再从干涉条纹中提取相位信息重构出好的观测图像,必须有用以消除大气扰动影响的闭合相位技术、频域采样的 u_v 覆盖技术和一个好的图像重构的方法。

3.1 闭合相位技术

闭合相位技术是光学综合孔径成像中消除大气扰动的关键技术之一,它首先由 1958 年 Jen2 neson^[4]提出,并在射电望远镜干涉阵中得到成功的应用。最早提出光学波段的综合孔径概念的是 D.H. Rogstad^[5],而 W. T. Rhodes 和 J. W. Good2 man^[6]于 1973 年的实验又具有重要的典型意义。1986 年 Baldwin 和 Haniff^[7]在 Nature 发表的单

个望远镜上的模板实验,标志着闭合相位技术在光学综合孔径成像方面趋于成熟。1996 年闭合相位技术成功地运用于剑桥大学的 COAST 望远镜干涉阵中,并实现了天体目标的成图观测^[8]。在了解闭合相位技术时,作为比较,首先要了解望远镜的增益误差和大气扰动所造成的条纹相位失真的情况。

三个或三个以上孔径相位闭合的方法可以将大气扰动^[9]或其它原因所造成的相位误差抵消掉,然后通过其它有效的算法恢复目标的真实信息。

用三个望远镜就可以组成闭合如图 3 所示

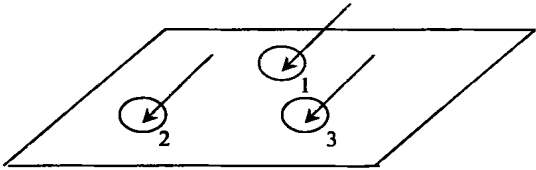


图 3 三个望远镜干涉仪略图

Fig. 3 Sketch map of three telescopes interferometer.

图中 1、2、3 为三个望远镜。共有三条基线,

记为 12, 23 和 31 星光透过大气到达三个望远镜后, 调整各自的光程差, 可以同时得到相应的三组条纹。现在仅考虑干涉条纹的相位:

基线 12 的相位

$$\mathcal{U}(1-2) = \mathcal{U}_0(1-2) + 2PR(A_2 - A_1), \quad (7)$$

其中, 对基线 12 测量所得到的相位记作 $\mathcal{U}(1-2)$, 而 $\mathcal{U}_0(1-2)$ 为相对于该基线的观测源的真实相位, 由于大气等原因形成的光程差 $A_2 - A_1$ (包括内光程差和外光程差), 其相位差为 $2PR(A_2 - A_1)$ 。

在三个望远镜同时观测同一目标时, 类似上式, 可推得另外两个式子:

$$\mathcal{U}(2-3) = \mathcal{U}_0(2-3) + 2PR(A_3 - A_2), \quad (8)$$

$$\mathcal{U}(3-1) = \mathcal{U}_0(3-1) + 2PR(A_1 - A_3), \quad (9)$$

上面三个式子结合起来, 得到:

$$\begin{aligned} \mathcal{U}(1-2-3) &= \mathcal{U}(1-2) + \mathcal{U}(2-3) + \mathcal{U}(3-1) \\ &= \mathcal{U}_0(1-2) + \mathcal{U}_0(2-3) + \mathcal{U}_0(3-1), \end{aligned} \quad (10)$$

$\mathcal{U}(1-2-3)$ 称为闭合相位, 由基线闭合的三角形的三个测量相位值相加, 它不受随机相位误差的影响。这个随机相位误差包括大气扰动和望远镜本身(光路本身所成的相位差)引起的。在闭合相位中, 待测源相位中的线性相位都抵消了, 因此闭合相位不反映视场中物体的位置, 但是, 闭合相位反映的是物的位相中的非线性项, 即物体的本征形状。

式(10)中有三个未知数 $\mathcal{U}_0(1-2)$, $\mathcal{U}_0(2-3)$ 和 $\mathcal{U}_0(3-1)$, 只有当两个为已知的前提下才能得到第三个。如果望远镜数目增加到 5 个时, 基线数 $N = C_2^5 = 10$, 可以形成的闭合三角形数目为 $C_3^5 = 10$, 因而有 10 个闭合相位值, 即 10 个等式, 10 个未知数, 能否将 10 个 $\mathcal{U}_0(i-j)$ 可以全部独立解出呢?

从线性代数知识可知, 上述十个等式十个未知数组成线性方程组, 若系数矩阵为满秩矩阵时可以解出 10 个 $\mathcal{U}_0(i-j)$ 的独立解; 反之, 该方程组为病态方程组, 不能得到独立的解。这可以通过下列解释说明:

对于有 N 个望远镜的光干涉仪阵而言, 三个望远镜可闭合成三角形, 形成闭合相位, 即 N 中

选 3 个, 共有 $C_N^3 = \frac{N(N-1)(N-2)}{3 \text{ @} 2 \text{ @} 1}$ 种可能的闭合三角形。

另外, N 个望远镜, 两两组合成基线, 共有 $C_N^2 = \frac{N(N-1)}{2}$ 条, 也就是说, 共有 $N(N-1)/2$ 个傅立叶相位。

上面已说明 N 个望远镜干涉阵中, 有 C_N^3 个闭合三角形, 亦即, 有 C_N^3 个闭合相位, 但并不是说所有的闭合相位都是独立的, 用图 4 可以清楚地说明:

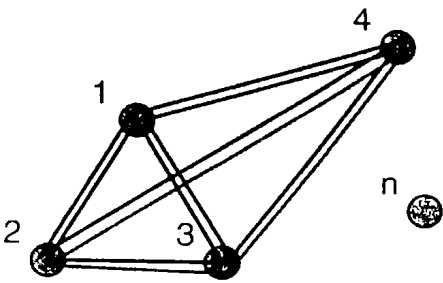


图 4 闭合相位之间关系图
Fig. 4 Relationship of triangles.

以四个望远镜为例, 则:

$$\begin{aligned} \mathcal{U}(1-2-3) &= \mathcal{U}(1-2-4) \\ &+ \mathcal{U}(4-2-3) + \mathcal{U}(1-4-3), \end{aligned} \quad (11)$$

对于有 n 个望远镜的干涉仪阵, 可以推广到如下式子:

$$\begin{aligned} \mathcal{U}(1-2-3) &= \mathcal{U}(1-2-n) \\ &+ \mathcal{U}(n-2-3) + \mathcal{U}(1-n-3), \end{aligned} \quad (12)$$

亦即, 在 C_N^3 个闭合相位中, 有 C_{N-1}^3 个是非独立的(每三个点组成的闭合三角形, 可以由如(12)式表示的其它多组三角形的组合, 即可以由该三角形中任两个点与剩下的 $N-3$ 个点组成三角形的组合来表示, $N-3+2 = N-1$, 即在 $N-1$ 个点中取 3 个点组成闭合三角形)。因此, 独立的闭合相位有:

$$C_N^3 - C_{N-1}^3 = \frac{(N-1)(N-2)}{2}$$

因而独立的闭合相位总是比需要求解的真实傅立叶相位数目少, 但含有的有效相位信息随着阵列中望远镜的个数增加而增加。表 1 显示了这些间的关系。

表 1 独立的闭合相位里含有的相位信息

Table 1 Phase information contained in the closure phases alone

Number of telescope n	Fourier phase (according to each baseline) C_n^2	Number of closing triangles C_n^3	Number of independent closure phase $C_n^3 - C_{n-1}^3 = C_{n-1}^2$	Percentage of phase information $C_{n-1}^2 / C_n^2 = 1 - 2/n$
3	3	1	1	33%
5	10	10	6	60%
7	21	35	15	71%
21	210	1330	190	90%
27	351	2925	325	93%
50	1225	19600	1176	96%

表中,列出了闭合三角形,独立的闭合相位以及以阵列中有 3~ 50 架望远镜为例可以恢复出来的有效信息。例如,对于有 21 台望远镜的干涉仪阵可以恢复约 90% 的相位信息。这些相位信息可以被用来重构观测源的亮度分布。因而对于一个 n 个孔径干涉阵,有 C_{n-1}^2 个独立的闭合相位

(通过观测可以得到的已知量), C_n^2 个欲求解的傅立叶相位(未知量)。

如何从 C_{n-1}^2 个方程组中求解出 C_n^2 个观测目标所对应的基线的傅立叶相位将在 3.3 节介绍。

3.2 u_v 覆盖

光学综合孔径成像中所涉及到的 u_v 覆盖简单地说是该光干涉仪阵对观测源在光学波段上的空间频率信息的抽样情况,光干涉仪阵中的基线愈长,探测到的频率愈高,基线愈短则探测到的频率就愈低。

3.2.1 光学综合孔径望远镜阵的 u_v 覆盖技术

一个光学综合孔径望远镜阵最长基线的长度是根据要观测的目标在最长的波长上所要达到的最高角分辨率决定的。仅一条最长基线就够了,而且这根最长基线方向是沿着所观测目标的最丰富细节方向的(即要求最高角分辨率方向)。

改善空间频率覆盖,在给定望远镜数目的情况下,可改变望远镜阵的几何排列,即望远镜阵中望远镜相对位置的变化。如图 5 为三孔非冗余掩模的结构排列。

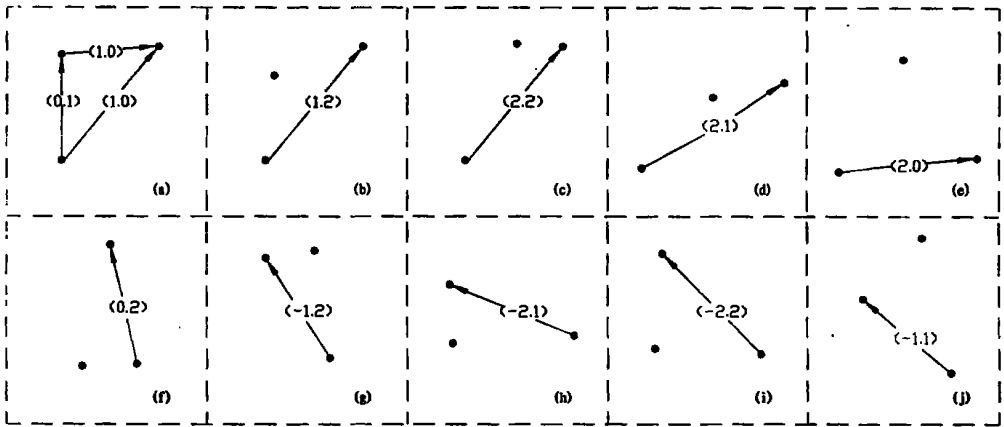


图 5 三孔非冗余掩模的结构排列图

Fig. 5 Non_redundant masks in triple interferometer sequence.

这里引进一个望远镜阵 u_v 平面覆盖效率的概念。在以下公式中,假定望远镜阵中有 N 个直径为 d 的圆孔径,没有中心遮挡,对每一个结构排列, u_v 平面覆盖可由入瞳的自相关函数给出。

对于一个 N 孔径的阵排列,自相关函数中有 $N(N-1)+1$ 点(N 个孔径共有 $C_N^2 = N(N-1)/2$ 条基线,每条基线在 uv 平面中有一个点和

一个共轭点,因而共有 $N(N-1)$ 个点,另加一个原点)。

基线长度用 a_i 表示($0 \leq i \leq N(N-1)/2$),由 $a_0 = 0$ 起始按递增的序列。

研究望远镜阵结构排列,能对 u_v 平面在半圈转动中全抽样(一直到由最长基线和波长给出的截止频率)。如果一个完善解存在于 N 个孔径

中, u - v 平面能被全覆盖, 一直到理想的截止频率 f_{co} 为止。在此:

$$f_{\omega} = \left\lfloor \frac{N(N-1)+1}{2} \right\rfloor \frac{2d}{K}, \quad (13)$$

例如, 一个直径为 d 的四孔径完善解与直径 $13d$ 的单一圆孔径有相同的 u - v 平面覆盖。当没有完善解存在时, 截止频率 f_c 是较低的, 能用一个效率因子 A 表示。

$$f_c = Af_{\omega} = A \left\lfloor \frac{N(N-1)+1}{2} \right\rfloor \frac{2d}{K}, \quad (14)$$

此式中, $A=1$ 即为完善解, $A<1$ 为非完善解, f_c 项是一直到它有可能全覆盖 u - v 平面的最高频率。

N 孔径的望远镜排列的模拟研究, 为了使 A 最小, A 可定义为:

$$A = \frac{N(N-1)}{2} \left[\max_i \left| \frac{N(N-1)}{2} - (a_{i+1} - a_i) \right| \right] \frac{1}{a_{N(N-1)/2}}, \quad (15)$$

如果一个完善解存在, $A=1$ 和 $a_i = i$ ①

对于 $0 \leq i \leq N(N-1)/2$, A 相对于 A 的函数表达为: $A=1/A$

3.2.2 增加 u - v 覆盖

从图 5 可知, 如果孔径掩模不一样, 获得的 u - v 覆盖情况也不一样。另外, 根据 (6) 式, 只要孔径数目增加, u - v 覆盖就可以增加。当然, 将各孔径所在的瞳面进行旋转也可以增加 u - v 覆盖(地面上的光干涉阵在观测恒星时可以随地球一起自转而完成有效的 u - v 覆盖)。 u - v 覆盖问题实际上是对目标源的空间频域信息的抽样问题, 如图 6 所示。

图中, 字母表示的是与每一个分量相联系的掩模。应用抽样理论, 容易得到合理的 u - v 覆盖。有界限的物体亮度分布的付里叶分量的离散测量值是能恰当地描述这个分布和综合孔径成像。一条基线在 u - v 平面上对应的是一个点, 它有 u 分量和 v 分量。旋转瞳面大于 90° 至 180° , 不须连续进行, 而是分隔成许多区间, 每一区间有 n 度, n 值可视满足 u - v 覆盖要求定。

光学综合孔径干涉成像存在两种情况, 即时 u - v 覆盖和非即时 u - v 覆盖两种情况。前面介绍的有限孔径数目的光学综合孔径阵在 u - v 平面上只是有限个点, 只有通过基线旋转的方法来满足全

覆盖或满足图像重构的 u - v 抽样, 它是以牺牲时间的代价来获得满足图像重构条件的。例如, 英国剑桥大学的 COAST, 在首次用三个孔径进行干涉成像时, 用整整一个晚上的观测时间, 得到 30 个干涉条纹的模和 10 个闭合相位, 完成了一幅分布比较简单的天体图^[8]。

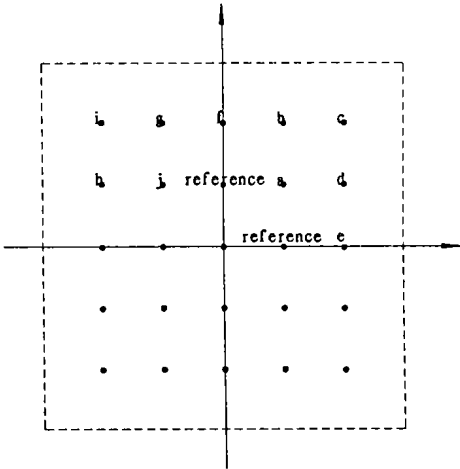


图 6 由图 5 掩模记录的反映傅立叶分量配置的空间频率图

Fig. 6 Spatial frequency diagram showing locations of Fourier components recorded with masks a2 according to Fig. 5.

对于时间分辨率要求较高的场合, 这种通过基线旋转来获得全覆盖办法就不能满足要求了, 即时 u - v 覆盖就是一种选择。

为了满足成像分辨率的要求, 使分隔的最大的子孔径间距保持与其(最长基线)相适应的距离, 并且增加子孔径的个数(包含足够多的基线)或增大子孔径的办法以达到全 u - v 覆盖的要求。这就是通常指的斐索干涉仪式的综合孔径望远镜系统。它的 u - v 平面覆盖由望远镜入瞳的自相关函数求出。全 u - v 覆盖的斐索干涉仪要求所有的 u - v 测量, 必须同时进行, 并在整个 u - v 测量范围不允许存在间隙。如果用光学传递函数分析得到的截止频率范围内不允许其传递函数值出现零点。斐索干涉仪望远镜系统全 u - v 覆盖既依赖孔径数目与孔径间距, 又和孔径大小有关, 所以子孔径宜置放于 Cornwell^[10] 成像位置, 可实现优化的 u - v 覆盖。另外从角分辨率 $Q = \lambda/D$ 式子, 也可知道斐索干涉仪 u - v 覆盖与其工作波段有关, 干涉仪阵列的 u - v 覆盖在单频(或窄波段)时存在着

一些洞,但是在采用宽频成像时,那些洞会被低频覆盖所充满。斐索干涉仪若是一个望远镜系统,就能获得对观测区域的快速成像,也就是说它可获得即时的全 $u-v$ 覆盖图像。

3.3 光学综合孔径干涉成像的像重构技术

从图 2 光学综合孔径望远镜干涉仪阵的像重构原理框图中可以看出,光学综合孔径阵的像重构技术是整个光学综合孔径望远镜干涉仪阵成图的最后的步骤,也是光学综合孔径干涉仪阵成像观测的关键技术之一。由于光学综合孔径干涉成像的特殊性(3.1 节中运用闭合相位技术抵消大气扰动等影响的同时,观测数据所包含有效信息的不完整),作为处理的过程和手段,在像重构时必须用到一些常规图像重构中成熟的、经典的算法,其中最有效的是洁图法 (CLEAN)^[11]和最大熵(MEM)^[1213]。

光学综合孔径成像中的像重构方法原理上与 CLEAN 和 MEM 两种主要方法相同。但是由于 3.1 节中用于像重构中对 $u-v$ 点进行傅立叶反变换得到的/脏图0 进行处理时,涉及到求解用闭合相位技术对目标相应基线的傅立叶相位解算时的病态方程组的问题。对于这个 C_{n-1}^2 个方程组中求解出 C_n^2 个观测目标所对应的基线的傅立叶相位的这些未知数的这个病态方程组,未知数个数比方程组多 $n-1$ 个,若预先知道这 $n-1$ 个值,则将这些 $n-1$ 个值代入方程组,就可以解出其它 C_{n-1}^2 个未知数。然后用这些解出的傅立叶相位,如果综合

孔径光干涉阵的排列设计合适,或通过基线旋转,就可以得到满足采样定理的频域采样的 $u-v$ 覆盖。从条纹可见度的测定 (以小于 10ms 短曝光成像,进行条纹可见度直接测量)得到基线所对应的振幅(模) A_i ,经过归一化处理,连同用闭合相位得到待测目标的傅立叶位相 H ,就可以得到像的频谱,对之进行傅立叶逆变换,即:

$$F = FFT^{-1}(\sum A_i \exp H), \quad (16)$$

F 就是光学综合孔径方法重构的高分辨率像。但是由于对观测源的 $u-v$ 不均匀采样而在傅立叶反变换后产生旁瓣,这实际上是含有很多噪声,甚至完全被噪声淹没的一幅/脏图0。因此需要用 CLEAN 或 MEM 方法进行处理,以便得到一幅干净的图像,对这幅干净图像进行反傅立叶变换,从反傅立叶变换的结果中/借出0 $n-1$ 个相位值,代入病态方程组求解,进入新一轮循环,直到得到满意的图像为止。

这里面涉及到这最初的 $n-1$ 个初始值的选取的问题。如果对观测物体一无所知,则可以先用/零0 取代这 $n-1$ 个初始值进行上述的循环计算。若对观测物体有所了解,譬如我们对观测的某天体,一般视之为一光源,该光源为一圆点。故最初可以对一个圆形图像进行反傅立叶变换,然后/借出0 $n-1$ 个相位值作为初始值;若为双星,则对两个圆形图像进行反傅立叶变换再作处理。这种方法称为迭代混合成图法,它的算法框图见图 7。

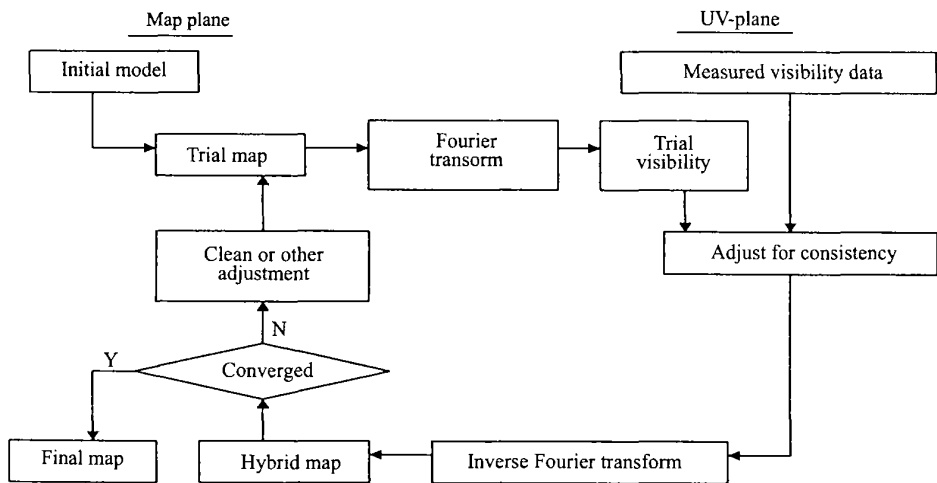


图 7 迭代混合成图法框图

Fig. 7 The iterative hybrid_mapping algorithm.

4 光学综合孔径干涉成像技术的应用

在不考虑视宁度影响的条件下, 只有增大望远镜的口径才能提高分辨率, 但是受技术和造价问题的影响望远镜口径不可能要做得多大就做得多大。光干涉技术与天文望远镜结合来提高望远镜的空间分辨率, 这就是光学综合孔径^[14]干涉成像技术。如何用小望远镜系统来达到单个大望远镜的分辨本领, 这就是光学综合孔径成像的目的。

高分辨率的目标成像观测在空间科学的应用(包括天文学研究和空间碎片的监测)上有着十分重要的意义: 在天文学的研究中, 通过高分辨率的干涉成图, 能对恒星风和密近双星物质流进行分辨, 从而研究质量损失机制; 为原恒星的研究提供形状、亮度分布等, 从而进一步研究天体的结构和演化; 也可以进行类星体和活动星核系等等天文学方面的研究。高分辨率的光干涉成像技术应用于地对空, 可以对地球卫星轨道的空间碎片进行观测和普查, 以保障空间飞行物的安全。

参考文献:

- [1] 李继陶. 统计光学基础[M]. 四川: 四川大学出版社, 1998.
- [2] Pierre Cruzaibes. Optical Simulation of a 5 Apertures Spectro_interferometer for IMAOINO[A]. Proc. ESO/ NOAO [C], 1988, 757_767.
- [3] Mozurkewich D. Array layout and Beam Combination Considerations Necessary For Imaging with a Long Baseline Optical Interferometer[A]. Proc. ESO/ NOAO[C] 1988, 801_804.
- [4] Jennison R C. A phase Sensitive interferometer technique for the measurement of the fourier transforms of spatial brightness distributions of small angular extent[J]. MNRAS, 1958, 118(3): 276_284.
- [5] Rogstad D H. A Technique for Measuring Visibility Phase with an Optical Interferometer in the Presence of Atmospheric Seeing[J]. Appl Opt, 1968, 7(4): 585_588.
- [6] Rhodes W T, Goodman J W. Interferometric technique for recording and restoring images degraded by unknown aberrations[J]. J. OPT. Soc. Am. A, 1973, 63(6): 647_657.
- [7] Baldwin J E, Haniff C A, Mackay C D. Close phase in high resolution optical imaging[J]. Nature, 1986, 320(17): 595_597.
- [8] Baldwin J E, Beckett M G, Boysen R C, et al. The first images from an optical aperture synthesis array: mapping of Capella with COAST at two epochs[J]. A and A, 1996, 306, 13_16.
- [9] Monnier J D. An introduction to Closure phases [A]. Principle of Long Baseline Stellar Interferometry. NASA Report. 2000[C]. Edited by P. R. Lawson, 2000, 203_230.
- [10] Cornwell T J. A novel principle for optimization of the instantaneous Fourier plane coverage of correlation arrays[J]. IEEE transaction on antennas and propagation, 1988, 36(8): 1165_1167.
- [11] 邱耀辉, 刘忠, 卢汝为, 等. Clean 算法在天文图像空域重建中的应用[J]. 云南天文台台刊. 2000, (2): 1_9.
- [12] Monnier J D. Infrared interferometry and spectroscopy of circumstellar envelope[D], Ph. D thesis, University of California at Berkeley, 1999.
- [13] 陶纯堪, 陶纯匡. 光子信息论[M]. 北京: 科学出版社, 1999, 187_208.
- [14] 王海涛, 周必方. 光综合孔径望远镜阵的光束组合器[J]. 光学学报, 2002, 9: 1109_1115.

Optical synthesis aperture interference image technology

WANG Hai_tao, ZHOU Bi_fang

(Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology,
National Astronomical Observatory, Nanjing 210042, China)

Abstract: Closure phase technology, U_V coverage technology and image reconstruction technology are three key technologies for optical synthesis aperture image. This paper details the closure phase theory, U_V coverage technology (which contains real time cover and non real time cover through aperture rotation) and the common method for image reconstruction, as well as the hybrid method for optical synthesis aper2 ture image. The applications of optical synthes is aperture interference image technology are discussed in the end.

Key words: optical interference; optical synthesis aperture; image reconstruction; closure phase; U_V cov2 erage

作者简介:王海涛(1968-),男,江苏省溧阳市人,中科院南京天文光学技术研究所博士,副研究员,从事光 电检测和光干 涉技术研究。

欢迎您订阅5光机电信息6

5光机电信息6是由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办的科技类信息刊物。主要报道国内外光机电领域的前沿与发展动态,内容包括光学、光电子学、激光、光通信、发光学、精密机械、医用光学、军用光学、航空航天技术、微机械、计算机与测量技术等高新技术的各个领域,涉及科技热点评述、趋势与动向、科学专题、研究综述、科学探索、市场动态、新产品开发和高新技术产业化等多方面内容。

为满足不同读者的不同需求,在传播和报道国内外最新信息的同时,我们努力将办刊和为科研生产服务有机地结合在一起,对5光机电信息6所报道的每一专题,乃至每一条信息,我们都可以利用长春光机所的丰富馆藏优势和先进的计算机检索系统,为读者展开深层次的文献跟踪服务,这是我们在新世纪对广大读者的又一庄重承诺!

本刊为月刊,国内外公开发行,每期定价 5100 元,全年 60100 元(含邮费)。个人订阅,通过邮局汇款。单位订阅,请填好订购单位通信签、长春光机所财务科存根5记帐凭证6,连同款项通过银行寄回。欢迎广大读者订阅并投稿。

地 址: 长春市 1024 信箱5光机电信息6编辑部

开户行: 中行吉林省分行营业部

帐 户: 04 单位 438 部

帐 号: 01471908091001

国内邮发代号: 12- 171

5光机电信息6编辑部