

天文斑点成像中的傅里叶 模复原和像复原实验*

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 在天文高分辨率像复原中, 目标的傅里叶模复原与相位复原同样重要。由于观测数据中存在着多种复杂噪声, 模和相位的复原将变得更加困难。本文针对在模复原中的各种噪声, 提出相应的噪声改正方法, 所给出的像复原实验表明, 这些方法是有效的和必须的, 它们保证了模的高精度复原。

关键词 斑点成像, 噪声, 模复原。

1 引 言

受大气湍流的影响, 传统长曝光天体摄影术的分辨率并不由望远镜口径决定, 而是取决于大气相干直径(大气视宁度参数) r_0 ^[1], 而在良好视宁度条件下, r_0 约为 10 cm, 对应的分辨率为 1"(角秒), 而口径为 1 m 和 5 m 的望远镜的理论分辨率应分别为 0.1"和 0.02", 可见, 分辨率的损失与望远镜口径成正比。

斑点成像技术能克服大气湍流噪声的影响, 实现望远镜的理论分辨率像复原^[2~4]。该技术的原始资料是目标和参考星的一系列短曝光像(曝光时间约 10 ms)——斑点图, 它是大气湍流噪声影响下的目标瞬时畸变像, 而且还掺入了多种复杂的噪声。例如大气视宁度差异引入的系统误差, 光子噪声、探测器附加噪声和其它因素引起的噪声等, 若不认真克服, 则不可能实现目标的高分辨率像复原。在斑点成像技术中, 一般用斑点干涉术^[2]复原目标的傅里叶模, 用 Knox-Thompson 法^[3]或斑点掩模法^[4]复原傅里叶相位, 以消除随机大气湍流噪声的影响而实现望远镜理论分辨率的像复原, 但数据中的复杂噪声使复原过程复杂化。本文针对云南天文台的斑点像探测系统的噪声对模复原的影响, 提出了相应的噪声改正方法, 给出了复原实验和高像质复原结果。

2 斑点干涉术中的基本定义

设天文目标强度分布为 $o(x)$, 在观测的某时刻, 大气-望远镜综合成像系统的瞬时点扩

* 国家自然科学基金(19873017)、中国科学院“西部之光”资助项目。

收稿日期: 1998-10-05; 收到修改稿日期: 1999-01-14

展函数为 $p(x)$ ，此时得到的目标瞬时像——斑点图为 $i(x)$ ，若目标在等晕区内，则它们将满足下面的线性系统卷积成像关系：

$$i(x) = o(x) \circledast p(x), \quad (1)$$

这里 x 为二维空间坐标变量， \circledast 为卷积算符，上式的傅里叶变换为

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

其中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。把一幅斑点图的功率谱表为 $I^{(2)}(u) = I(u)I^*(u)$ ，这里 $I^*(u)$ 为 $I(u)$ 的复共轭，其余类推，如 $O^{(2)}(u)$ 为目标功率谱。用 $\langle \rangle$ 表示其内量的时间平均，即对所观测的一系列斑点图进行统计平均，则 $\langle I^{(2)}(u) \rangle$ 即为大量目标斑点图的平均功率谱，则目标功率谱由下面的除法消卷积式得到：

$$O^{(2)}(u) = \frac{\langle I^{(2)}(u) \rangle}{\langle P^{(2)}(u) \rangle}, \quad (3)$$

其中 $\langle P^{(2)}(u) \rangle$ 被称为“斑点干涉术传递函数”(SITF)，可由观测目标近旁的一点源单星(参考星)的大量斑点图并计算平均功率谱得到。显然对目标功率谱开平方即得到所复原的目标傅里叶谱的模 $|O(u)|$ 。

下面将讨论各种噪声对斑点干涉术的影响和相应的改正方法。

3 目标和参考星观测期间大气视宁度差引入的系统误差及改正方法

Korff 的理论^[5]和实践证明，斑点干涉术传递函数可表示为

$$F = \langle P^{(2)}(u) \rangle = \langle P(u) \rangle^{(2)} + \left(\frac{r_0}{D_0}\right)^2 P_0(u), \quad (4)$$

上式右边第一项是大气-望远镜综合系统对点源单星的长曝光像(长曝光点扩展函数)的功率谱，构成了低频部分，截止频率为 $u_L = r_0/\lambda f$ ，

第二项中的 $P_0(u)$ 是望远镜的理论光学传递函数，它延伸到望远镜的理论衍射受限截止频率 $u_0 = D_0/\lambda f$ ，构成了高频部分，这里 D_0 为望远镜的入射光瞳直径， λ 为光波长， f 为成像系统(望远镜+斑点相机)的焦长。这表明斑点干涉术传递函数的形状与 r_0 密切相关，图 1 为斑点干涉术传递函数过中心截面上的曲线。在观测目标和参考星的斑点图时，是分时地进行的，由于大气随机系统的平稳时间有限，观测时大气

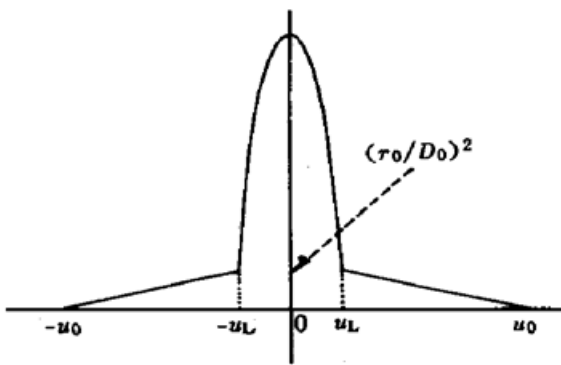


Fig. 1 The curve of SITF (the map of the section crossing the centre of SITF)

视宁度的差异引入的系统误差将使模复原受到很大影响。假设在拍摄目标和参考星的系列斑点图时，大气的视宁度参数分别为 r_0 和 r'_0 ，对应的斑点干涉术传递函数分别为 F 和 F' ，分别代入(3)式后相比得

$$O(u)^{(2)'} = O(u)^{(2)} \frac{F}{F'}, \quad (5)$$

其中 $O(u)^{(2)'}$ 为用在视宁度 r'_0 下观测的参考星得到的 F' 消卷积后的目标功率谱，若 $F' \neq F$ ，则 $O(u)^{(2)'}$ 将含有系统误差而不等于正确的目标功率谱 $O(u)^{(2)}$ ，必须加以改正。为此，首先要有判别目标或参考星的一组斑点图的平均功率谱所对应的斑点干涉术传递函数的视宁度参数

r_0 。监测 r_0 的方法很多, 这里, 选用谱比法^[6] 来判断一组斑点图中隐含的 r_0 值。原理是: 求该组斑点图的长曝光像的功率谱与斑点图的平均功率谱之比, 用 $R(u)$ 表示, 由(2)式, 有

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

上式表明: 1) 谱比 $R(u)$ 与目标无关, 可通用于目标和参考星。2) 谱比的截止频率为 u_L , 因此可从 $R(u)$ 的曲线来判断各组斑点图的 r_0 是否相同, 然后把具有相同 r_0 的目标和参考星的斑点图组归于一类中, 进行(3)式的消卷积处理, 从而消除由 r_0 的差异引入的系统误差。我们在不同的视宁度条件下进行了大量的谱比和分类实验: 1990 年用云南天文台 CCD-1 为探测器在 1 米望远镜上对几个天文目标进行观测时, 由于数据采集速度太慢, 目标和参考星各观测了 150 幅, 用的观测时间约 2 小时, 虽然视宁度较好, 因斑点图数量太少, 观测期过长, 却无法进行谱比计算和分类, 而直接进行斑点掩模法像复原实验, 结果得到的是信噪比很低的“复原像”^[7], (详见第 5 节); 1995 年, 在改进了探测器以后^[8], 对每幅 128×128 像元的斑点图, 记录速度为 6 幅/秒, 在 20 分钟内就观测了目标和参考星的斑点图各 3000 多幅, 以 200 幅为一组计算其谱比并进行比较和分类。由于视宁度较好, 所有组的谱比曲线相差很小; 但当与另一目标的谱比曲线相比(观测时间相隔 25 分钟以上)则有较大差别。在校准了视宁度和克服了其它噪声后进行的斑点掩模法像复原实验, 得到了极好的结果^[8]。此外还在视宁度较差时进行了分类实验。由此我们发现如下几个要点: 1) 由于 r_0 是某段时间内的统计平均量, 在具有足够的数据采集速度的前提下(以保证有足够的统计样本), 用于谱比计算的每组斑点图幅数应在 10^2 以上。2) 视宁度较好时, 在 20 分钟内观测的斑点图, 谱比曲线基本相同, 如图 2 所示; 相隔 20 多分钟后视宁度就有明显差异, 如图 3 所示。3) 在视宁度较差时的实验表明, 3~5 分钟后视宁度就会有非常明显的差异。

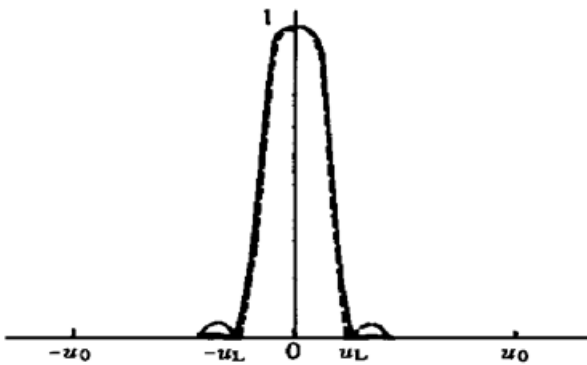


Fig. 2 The spectral ratio curve of $R(u)$ with a little difference in r_0 of the object (solid line) and the reference star (dashed line)

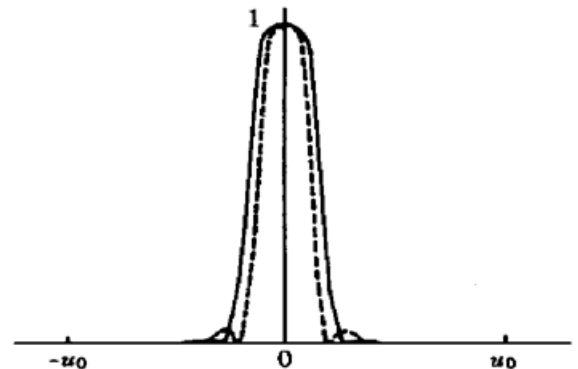


Fig. 3 The spectral ratio curve of $R(u)$ with a great difference in r_0 of the object (solid line) and the reference star (dashed line)

4 斑点干涉术中附加噪声的影响和改正

4.1 除法消卷积中附加噪声的严重影响

上面给出的是理想情况下对斑点图的描述, 实际情况却要复杂得多。对于有噪声的每幅目标斑点图用 $s(x)$ 表示, 其傅里叶谱为 $S(u)$, 一幅斑点图中的附加噪声为 $z(x)$, 其傅里叶变换为 $Z(u)$, 实测表明, 它主要是散粒噪声, 因此具有很宽的频率范围, 将对要复原的高分辨率细节所对应的高频信息产生严重干扰。在这种情况下, (1)式和(2)式分别变为

$$s(x) = i(x) + z(x) = o(x) \otimes p(x) + z(x), \quad (7)$$

和

$$S(u) = I(u) + Z(u) = O(u)P(u) + Z(u). \quad (8)$$

$S(u)$ 的功率谱为

$$S^{(2)}(u) = I^{(2)}(u) + Z^{(2)}(u) + I^*(u)Z(u) + I(u)Z^*(u), \quad (9)$$

它的平均功率谱用 $\langle S^{(2)}(u) \rangle$ 表示。按通常实际情况, 假设信号 $i(x)$ 与附加噪声 $z(x)$ 是相互独立的, 且附加噪声是零平均的, 那末上式中信号与附加噪声的互相关项的统计平均为零, 则上式统计平均结果为

$$\begin{aligned} \langle S^{(2)}(u) \rangle &= \langle I^{(2)}(u) \rangle + \langle Z^{(2)}(u) \rangle + \langle I^*(u)Z(u) \rangle + \langle I(u)Z^*(u) \rangle = \\ &= \langle I^{(2)}(u) \rangle + \langle Z^{(2)}(u) \rangle + \langle I^*(u) \rangle \langle Z(u) \rangle + \langle I(u) \rangle \langle Z^*(u) \rangle = \\ &= \langle I^{(2)}(u) \rangle + \langle Z^{(2)}(u) \rangle = O^{(2)}(u) \langle P^{(2)}(u) \rangle + \langle Z^{(2)}(u) \rangle. \end{aligned} \quad (10)$$

上式表明, 尽管附加噪声具有零平均的统计特性, 但目标斑点图的平均功率谱中仍然具有以附加方式出现的噪声项, 这里的 $\langle Z^{(2)}(u) \rangle$ 是每幅斑点图中的随机附加噪声的二阶矩统计, 它的频率域象 $Z(u)$ 一样宽, 是不可忽视的。

对于云台的 ICCD(德国 SIM-ICCD-05/S) 斑点探测器, 由于灵敏度很高, 当对中、低亮度目标观测时, 呈现出光子计数性质, 所产生的光子噪声和探测器附加噪声的影响已经在文献 [8] 中被详细讨论过了。为了改正重谱的噪声偏差, 文中只给出了怎样得到无噪声偏差的目标斑点图的归一化平均功率谱, 而并未讨论噪声对消卷积——复原目标功率谱时的影响。下面将对此进行详细讨论。由文献 [8] 中得到的目标斑点图的平均功率谱可表为

$$\langle S(u)^{(2)} \rangle = O(u)^{(2)} \langle P(u)^{(2)} \rangle + N(u), \quad (11)$$

这里各项与文献 [8] 中的 (13) 式中各项的对应关系为:

$$\langle S(u)^{(2)} \rangle \leftrightarrow E[D(u)^{(2)}], \quad O(u)^{(2)} \langle P(u)^{(2)} \rangle \leftrightarrow C_{p0}G(u)^{(2)} \langle J(u)^{(2)} \rangle, \quad N(u) \leftrightarrow C_{p1}G(u)^{(2)},$$

而一般的非归一化的、无噪声偏差的目标斑点图平均功率谱即为 $O(u)^{(2)} \langle P(u)^{(2)} \rangle$ 。文献 [8] 的分析表明: 光子噪声和探测器附加噪声都是产生功率谱的附加噪声项的重要来源, 它们都被归纳于 $N(u)$ 中, 是可求出的已知量; 因此 (11) 式是同时考虑了光子噪声、探测器附加噪声和其它复杂因素产生的附加噪声的目标斑点图平均功率谱的表达式, 更具普遍性。下面的讨论中将用它代替 (10) 式。

为了复原得到目标功率谱 $O(u)^{(2)}$, 由下面的除法消卷积式来实现:

$$O(u)^{(2)} = \frac{\langle S(u)^{(2)} \rangle - N(u)}{\langle P(u)^{(2)} \rangle} = \frac{\langle S(u)^{(2)} \rangle}{\langle P(u)^{(2)} \rangle} - \frac{N(u)}{\langle P(u)^{(2)} \rangle}, \quad (12)$$

其中 $\langle P(u)^{(2)} \rangle$ 由计算参考星一系列斑点图的非归一化无偏平均功率谱得到。上式除法运算中有一个严重的问题是: 等式右边第二项中 $N(u)$ 的频率域很宽, 而 $\langle P(u)^{(2)} \rangle$ 在从 u_L 到 u_0 的高频区之值却越来越小(见图 1), 用它为分母进行的除法将导致 $\frac{N(u)}{\langle P(u)^{(2)} \rangle}$ 在此频率域上的噪声出奇地大, 特称此现象为“高频噪声放大”, 而在此频率段上的目标信息正是想方设法要得到的, 这样的除法消卷积将使最感兴趣的高频信息无法复原得到, 这就是以附加形式出现的噪声对除法消卷积复原法的最大影响。

4.2 消除除法消卷积中附加噪声影响的维纳滤波器

为排除“高频噪声放大”这一影响, 我们采用了维纳滤波器, 基于文献 [9] 中对一般像复

原中针对除法消卷积时使用的维纳滤波器的原理和推导, 可导出适用于(12)式的维纳滤波器 $W(u)$ 。先考虑这样一个问题, 若要由一幅斑点图复原目标的像, 将用到类似于(12)式的消卷积算法来得到目标像的傅里叶谱:

$$O(u) = \frac{S(u) - Z(u)}{P(u)} = \frac{S(u)}{P(u)} - \frac{Z(u)}{P(u)}. \quad (13)$$

在文献[9]中, 戚康男等经过较为复杂的推演后得到了适用于(13)式的维纳滤波器 $W_s(u)$:

$$W_s(u) = \frac{O^{(2)}(u)P^*(u)}{O^{(2)}(u)P^{(2)}(u) + Z^{(2)}(u)}, \quad (14)$$

其中 $P^*(u)$ 为 $P(u)$ 的复共轭, 且上式分母为实函数。有了滤波器就可得到理想的目标复原像:

$$O_s(u) = W_s S(u) = \frac{O^{(2)}(u)P^*(u)}{O^{(2)}(u)P^{(2)}(u) + Z^{(2)}(u)} S(u). \quad (15)$$

实际上由于一幅斑点图的信噪比太低, 而且无法得到其瞬时点扩展函数 $P(u)$, 这才发明出斑点干涉术, 它求的是一系列斑点图的平均功率谱, 所以(13)式无法被用上, 但由之可推导出适用于斑点干涉术的滤波器。对(15)式两边同时乘上各自的复共轭后得到

$$O_s^{(2)}(u) = \frac{O^{(2)}(u)P^{(2)}(u)}{O^{(2)}(u)P^{(2)}(u) + Z^{(2)}(u)} \frac{O^{(2)}(u)}{O^{(2)}(u)P^{(2)}(u) + Z^{(2)}(u)} S^{(2)}(u). \quad (16)$$

对上式两边求所有斑点图的平均得

$$\begin{aligned} \langle O_s^{(2)}(u) \rangle = O_s^{(2)}(u) &= \frac{\langle O^{(2)}(u) P^{(2)}(u) \rangle}{\langle O^{(2)}(u) P^{(2)}(u) \rangle + \langle Z^{(2)}(u) \rangle} \times \\ &\frac{\langle O^{(2)}(u) \rangle}{\langle O^{(2)}(u) P^{(2)}(u) \rangle + \langle Z^{(2)}(u) \rangle} \langle S^{(2)}(u) \rangle. \end{aligned} \quad (17)$$

上式中的 $O^{(2)}(u)$ 应由斑点干涉术得到:

$$O^{(2)}(u) = \frac{\langle S^{(2)}(u) \rangle - \langle Z^{(2)}(u) \rangle}{\langle P^{(2)}(u) \rangle}. \quad (18)$$

注意到(10)式, 则有

$$O_s^{(2)}(u) = \left[1 - \frac{\langle Z^{(2)}(u) \rangle}{\langle P^{(2)}(u) \rangle + \langle Z^{(2)}(u) \rangle} \right] \frac{\langle S^{(2)}(u) \rangle - \langle Z^{(2)}(u) \rangle}{\langle P^{(2)}(u) \rangle}. \quad (19)$$

为了不失一般性, 用 $N(u)$ 代替 $\langle Z^{(2)}(u) \rangle$ 则有

$$O_s^{(2)}(u) = \left[1 - \frac{N(u)}{\langle P^{(2)}(u) \rangle + N(u)} \right] \frac{\langle S^{(2)}(u) \rangle - N(u)}{\langle P^{(2)}(u) \rangle}. \quad (20)$$

下面令

$$W(u) = 1 - \frac{N(u)}{\langle P^{(2)}(u) \rangle + N(u)} = 1 - \frac{N(u)}{O(u)^{(2)} \langle P^{(2)}(u) \rangle + N(u)}, \quad (21)$$

将 $W(u)$ 称为“斑点干涉术维纳滤波器”, 显然 $W(u)$ 具有很好的滤波效果: 在 $\langle P^{(2)}(u) \rangle$ 很小或趋于零的高频区, $W(u)$ 趋于零, 使除法消卷积的运算结果 $(\frac{\langle S^{(2)}(u) \rangle - N(u)}{\langle P^{(2)}(u) \rangle})$ 的高频噪声被抑制, 而在其值较大的中、低频率区, $W(u)$ 趋于 1, 从而能使下式的消卷积达到很好的复原效果:

$$O_s(u)^{(2)} = \left[1 - \frac{N(u)}{O(u)^{(2)} \langle P^{(2)}(u) \rangle + N(u)} \right] \frac{\langle S^{(2)}(u) \rangle - N(u)}{\langle P^{(2)}(u) \rangle}. \quad (22)$$

对于无噪声的情况, 即当 $N(u) = 0$ 时, (22)式与上述(3)式相一致。必须指出的是, 用于消

卷积的斑点干涉术传递函数 $P(u)^{(2)}$ 如果是由实际观测目标近旁的一点源单星的一系列斑点图后计算它们的平均功率谱得到的, 则它也必然具有噪声偏差, 只有改正了噪声偏差后才能用来消卷积。

此外, 在维纳滤波器性质的启发下, 我们还使用过其它类似的滤波器, 例如截止频率等于望远镜衍射受限截止频率 u_0 的二维高斯函数、一米望远镜的理论光学传递函数等, 经它们滤波后, 高频噪声均得到了很好的抑制, 从而保证了最终的高像质复原。

5 对天文目标进行的斑点干涉术噪声偏差改正和像复原实验

由于观测仪器等条件的差异, 我们分别在 1990 和 1995 年对天文目标进行了两次斑点掩模法像复原实验。相同的观测条件是: 用云台一米望远镜观测, 大气视宁度较好, 斑点相机的滤光片中心波长为 530 nm, 光通带宽为 50 nm, 成像系统: 望远镜+ 斑点相机的焦长为 130 m, 每幅斑点图曝光时间为 20 ms。不同之处是探测器大为改进了。

在 1990 年, 由于斑点相机使用的是光灵敏度较低的云台 CCD-1 探测器, 因有制冷系统, 噪声相对较小, 所观测的目标和它们的参考星都是 3 等左右的高亮度目标。在对它们进行的斑点掩模法像复原实验中, 有如下两个缺陷: 其一是如前所述, 由于记录速度慢而无法对斑点图作视宁度的分类实验, 所以用斑点干涉术进行目标傅里叶模的复原中, 没有消除大气视宁度差引入的系统误差; 其二是在用除法消卷积时没有使用滤波器, 尽管与 1995 年的像复原实验相比, 探测器的各种噪声都很小, 但复原得到的目标功率谱仍然含有严重的高频噪声。

图 4 为消卷积后仍含有噪声的双星 ζ Sgr 的功率谱, 所用的目标和参考星的斑点图均约为 150 幅。由图中可明显看出, 目标功率谱干涉条纹四周的高频区布满了明显的附加噪声, 用这样的模复原的目标像中必然产生严重的高频失真, 图 5 为双星 ζ Sgr 的严重失真的“复原像”, 在高频噪声干扰下, 本应为望远镜理论衍射艾里斑的每个双星成员均被拉成细长形, 且在其周围散布着噪声小点。

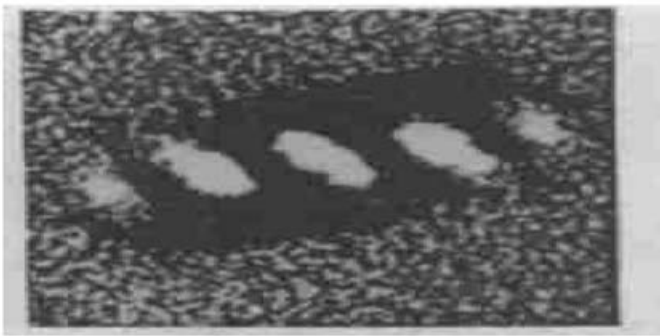


Fig. 4 The reconstructed power spectrum with noise of binary ζ Sgr

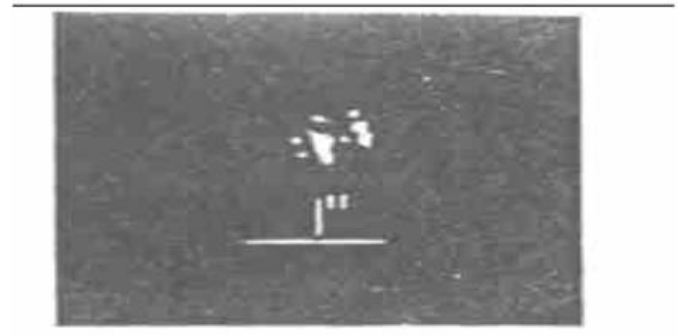


Fig. 5 The result of image reconstruction distorted seriously of binary ζ Sgr

在 1995 年进行的斑点掩模法像复原实验中, 上述的两个严重问题都得到了彻底的解决: 一是使用了具有高微光探测性能(德国 SIM-ICCD-05/S 探测器)的二维光子计数像探测系统, 且数据采集记录速度达到了 6 幅/秒(每幅 128×128 像元), 20 分钟内可得到目标和参考星的斑点图各 3000 多幅, 为对斑点图进行视见度分类和匹配提供了保证, 从而消除了大气视宁度差所产生的系统误差。二是在用斑点干涉术复原目标傅里叶模时, 消卷积的过程中采用了维纳滤波器或其它类似的滤波器, 有效地消除了高频噪声。

图 6 为复原得到的天文双星 ADS16800 的功率谱, 使用的目标和参考星斑点图分别为 3000

幅和2496幅, 由于在20分钟内观测完毕, 大气视宁度相差很小, 共对斑点图分了3类, 每类中分别有目标和参考星斑点图各为约1000幅。与图4相比可明显看出, 高频噪声已基本被抑制住, 这就保证了最后的像复原的高质量。

图7为双星 ADS16800的高精度复原像, 与图5相比较, 由于没有高频噪声的干扰, 双星的两个成员都是一米望远镜的衍射受限点扩展函数——艾里斑, 经测量, 其两成员的角距为 $0.17''$ (接近一米望远镜的理论衍射受限分辨率 $0.14''$), 两个成员的强度比为 $0.9 \sim 1.0$, 与星表的预测比值 $1.0 \sim 1.0$ 非常接近。



Fig. 6 The reconstructed power spectrum without noise of binary ADS16800

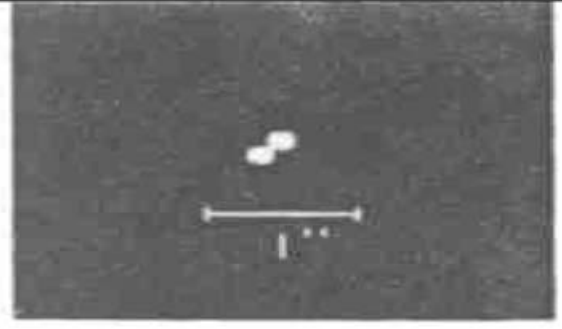


Fig. 7 The reconstructed image of binary ADS16800

结 语 1990年9月的实验中, 尽管 CCD-1 探测器有制冷系统, 而且没有加微光像增强器(否则将具有严重的光子噪声和探测器附加噪声), 目标和参考星都是高亮度水平的, 所以探测器的附加噪声和光子噪声都很小, 斑点图的信噪比应该说是比较高的, 但由于消卷积时没有采用滤波器, 复原过程仍然受到严重的高频附加噪声干扰, 导致复原像信噪比很低; 而在1995年的像复原实验中, 虽然探测器具有严重的光子噪声和探测器附加噪声, 但在除法消卷积时使用了滤波器, 有效地抑制了高频噪声, 复原得到了很好的目标功率谱或模, 与高精度相位谱的复原^[10]一起, 为高像质复原提供了最基本和最重要的保证。再者, 探测器的改进, 也提供了进行视宁度分类消卷积的可能, 消除因视宁度差引入的系统误差无疑也为高像质复原打下了基础。

上述两实验的反差明显, 功率谱和像复原质量之间的明显差异充分说明了除法消卷积中使用滤波器和视宁度校准是必要的和有效的。

参 考 文 献

- [1] 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
- [2] 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
- [3] Knox K T, Thompson B J. Recovery of images from atmospherically-degraded short-exposure photographs. *Astrophys. J.*, 1974, **193**(1) : L45~ L48
- [4] Lohmann A W, Weigelt G P, Wirtzner B. Speckle masking in astronomy-triple correlation theory and application. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24) : 4028~ 4037
- [5] Korff D. Analysis of a method for obtaining near diffraction limited information in presence of atmospheric turbulence. *J. Opt. Soc. Am.*, 1973, **63**(8) : 971~ 980

- [6] von der Lüthe O. Estimating Fried's parameter from a time series of an arbitrary resolved object imaged through atmospheric turbulence. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1984, **1**(5) : 510~ 519
- [7] 邱耀辉, 吕瑞宁, 钱 莘等. 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
- [8] 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率像复原实验. *光学学报*, 1999, **19**(2) : 163~ 170
- [9] 戚康男, 秦克诚, 程 路等. *统计光学导论*. 天津: 南开大学出版社, 1987. 719~ 725
- [10] 刘 忠, 邱耀辉, 楼 柯等. 斑点掩模法中的位相复原实施方法和像复原实验. *光学学报*, 1999, **19**(7) : 935~ 940

Fourier Modulus Recovery in Astronomical Speckle Imaging and the Experiments of Image Reconstruction

Qiu Yaohui Liu Zhong Lu Ruwei Lou Ke

(*Yunnan Observatory, The Academy of Sciences, Yunnan*)

(Received 5 October 1998; revised 14 January 1999)

Abstract In astronomical high resolution image reconstruction, Fourier modulus recovery is as important as the phase recovery of a object, because there are many kinds of complex noise in observations and the recovery of modulus or phase will become more difficult. To solve the problem of the noise of all kinds in the modulus recovery, some appropriate methods are provided. The experimental results of image reconstruction show that these methods are effective and necessary, they ensured the high precision modulus recovery.

Key words speckle image, noise, modulus recovery.