

文章编号: 1000-8349(2010)01-072-21



# 由斑点图重建天文图像的方法

霍卓玺<sup>1,2,3</sup> 周建锋<sup>1,2,3</sup>

(1. 清华大学 工程物理系 天体物理中心, 北京 100084; 2. 清华大学 粒子技术与辐射成像教育部重点实验室, 北京 100084; 3. 高能辐射成像国防重点学科实验室, 北京 100084)

**摘要:**首先介绍了斑点图形成机制以及获取方法,并借助计算机模拟了斑点图的生成。然后重点描述斑点图的图像重建方法,包括频率域和空间域重建方法。在频率域重建方法部分依次详细叙述了用于复原模信息的斑点干涉法和用于复原相位信息的由模复原相位法、Knox-Thompson法、斑点掩模法;空间域重建方法部分介绍了典型的LWH法和迭代位移叠加法;另外,盲消卷积法也为斑点图重建提供了新的思路,文章对此方法也做了介绍;特别地,还对国内在该领域的相关工作做了介绍;关于斑点图重建方法在天文学、天体物理学等领域的应用,文章做了有针对性的介绍;最后一章是斑点图图像重建方法的总结。

**关键词:**斑点图重建;频率域重建方法;空间域重建方法

**中图分类号:** P114 **文献标识码:** A

## 1 引言

天文望远镜有两个基本性能<sup>[1]</sup>: (1) 集光能力,即探测暗弱天体的能力; (2) 分辨能力,即探测目标细节的能力。在不存在大气扰动的情况下,这两个性能都随着望远镜口径的增大而增强,但是当存在大气扰动时,分辨能力将受到大气视宁度的限制,而非望远镜口径限制(又称为衍射极限)。

大气是各向异性并且不均匀的随机介质。大气的折射率分布是随机向量场。人们用大气抖动来形象地描述这一情形。大气视宁度用来描述大气因抖动而造成视野中光源闪烁或者模糊的程度强弱。视宁度越好,大气就越稳定,视野中光源经成像系统成像质量也越好;反之,视宁度越差,大气抖动越剧烈,视野中光源经成像系统成像质量越差,闪烁、模糊程度越强。天

收稿日期: 2009-04-09; 修回日期: 2009-07-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10603004); 国家重点基础研究发展计划(973)(2009CBB24800)

文学视宁度专门用来描述大气抖动对天体这类光源经望远镜成像的影响。目前, 对于大气抖动对光学成像系统的影响机制解释得比较好的是柯尔莫哥洛夫大气湍流模型<sup>[2,3]</sup>。

为了消除大气对望远镜成像的不良影响, 科研工作者提出各种各样的方法。这些方法中有针对成像环节, 通过改进成像设备来获得高分辨率图像的自适应光学, 也有大量针对观测结果, 通过处理图像来重建高分辨率图像的斑点成像方法。

斑点成像方法处理的对象是斑点图, 斑点图是使用口径远远大于大气相干长度(相差一个数量级以上)的望远镜在有随机介质扰动(例如大气)的情况下对天体进行短曝光(曝光时间小于大气湍流的相干时间, 通常是 mm 量级)成像获取的。这种方法始于法国天文学家 Labeyrie<sup>[4]</sup> 的开创性工作。Labeyrie 提出的斑点干涉法可以复原目标像的功率谱。这对于中心对称的目标来说已经足够, 但是对于更普遍的目标来说还是不够的, 于是此后又出现了用于复原目标像的相位谱的方法。如 Knox 和 Thompson<sup>[5]</sup> 于 1974 年提出的 Knox-Thompson 法(或称 K-T 法)、Fienup 于 1978 年<sup>[6]</sup> 提出的由模复原相位的方法, 以及 Lohmann 于 1983 年<sup>[7]</sup> 提出的斑点掩模法(Speckle masking)等。以上提到的方法都是针对图像的傅里叶变换进行处理, 可以统称为傅里叶频率域的方法。Dainty 在 1984 年的综述中集中介绍过斑点图的若干重建方法<sup>[8]</sup>, 仇朴章也介绍过这些方法, 并且使用统一的理论框架进行了讨论<sup>[1]</sup>。

傅里叶频率域的方法可以复原出目标接近衍射极限的图像, 但也存在一些问题。最突出的就是方法复杂, 而且往往伴随复杂的计算。于是又出现了直接处理图像的空间域的方法。比如简单位移叠加法<sup>[9]</sup>、LWH 法<sup>[10]</sup> 以及迭代位移叠加法<sup>[11]</sup> 等。

近年来, 基于统计学的方法也被应用于斑点图的图像重建中, 如使用严格先验约束的最大似然盲消卷积法<sup>[12-14]</sup>、乘性迭代消卷积法<sup>[15]</sup>、更加一般的非对称乘性消卷积法<sup>[16]</sup> 以及使用随机场正则化的最大后验盲消卷积法<sup>[17]</sup> 等。这些方法一般是通过盲消卷积来(Blind deconvolution)进行图像重建。

盲消卷积是一类从模糊图像中恢复潜在的目标图像的方法的统称。这类方法的特点是并不需要了解成像系统的点扩展函数。目前应用于天文图像重建的盲消卷积类方法主要采用迭代算法实现。迭代算法则主要从期望值最大化算法(Expectation-maximization algorithm)出发。

应用斑点图重建技术既可以作为其他观测技术或者设备的辅助, 也可以直接取得科学成果。一方面, 利用斑点图重建技术可以改善成像仪器的性能<sup>[18]</sup>, 可以检测天文望远镜的成像质量<sup>[19]</sup>; 另一方面, 利用斑点图重建技术对观测结果进行处理也可以在原有观测设备基础上对天文目标取得新的认识, 对其物理机制有新的理解<sup>[20-28]</sup>。

正文的第 2 章中主要介绍了斑点图的获取方法以及计算机模拟; 第 3 章中介绍斑点图的频率域重建方法, 分别包含复原模信息的方法和复原相位信息的方法; 第 4 章中介绍斑点图的空间域重建方法; 第 5 章介绍盲消卷积类的方法; 第 6 章用以专门介绍国内在该斑点图重建领域的相关工作; 第 7 章介绍了近年来斑点图重建方法取得的科学成果; 在论文的第 8 章, 作者

对全文进行总结。

## 2 斑点图的获取与模拟

斑点图 (Speckle 或者 Speckle pattern) 是指由一组波前互相干涉形成的具有随机性的强度分布图案。虽然牛顿时代的科学家就对斑点图现象进行过研究和调查,但是直到人们发明了激光器,斑点图才得到广泛关注。现在人们所说的斑点图一般是指激光经过随机介质传播后形成的光斑。然而,通过地面大型天文望远镜对天体目标中的点光源进行观测,获取的图像中也可能存在斑点结构。这是大气视宁度造成的。大气本身就是一种随机介质,可以对光波波前的相位造成随机的扰动<sup>[4]</sup>。

### 2.1 斑点图的获取

前文已经提到过,斑点图是波前相互干涉形成的,这就意味着,形成斑点图的光波需要具备相干性。尽管通常都把一般的天体目标成像归为非相干光照射成像,但是当曝光时间很短时还是可以拍摄到具有斑点结构的图像。斑点图中的最小的斑点结构尺寸与望远镜不受视宁度以及像差影响时的艾里半径相同,可想而知,斑点图较之长曝光图像含有关于小尺度结构的更丰富的信息<sup>[4]</sup>。很多方法都是通过处理斑点图来重建天体目标的高分辨率像。

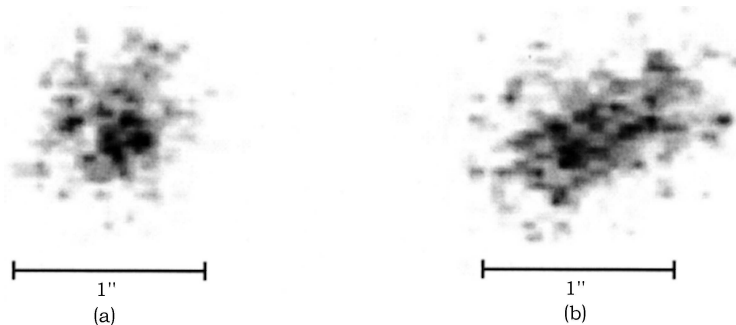


图 1 云南天文台获取的斑点图

(a) 为 ADS16800<sup>[11,30]</sup>; (b) 为 ADS11344<sup>[11]</sup>

在这里介绍两个概念,即大气相干长度 (Atmosphere coherence length) 和大气相干时间 (Atmosphere coherence time)。因为大气的折射率是关于时间变量与三维空间变量的随机向量场函数,所以在大气中传播的光波的相位也受到随时间和空间位置变化的随机扰动。如果在某个区域内,同一时刻相位在不同空间位置的差的方均根误差在容许范围之内(如 1 弧度),就称这个区域的半径为大气相干长度,或者称大气截面相干长度 (Atmosphere transverse coherence length),或者称 Fried 参数 (Fried's parameter),也称衍射受限光瞳 (Diffraction-limited aperture),这些概念都描述大气的空间域相干性。如果在一段时间之内,同一空间位置的相位偏差

的方均根误差在容许范围之内(比如 1 弧度), 就称这段时间的长度为大气相干时间, 这个概念描述大气的时间域相干性。上述两个概念都有不同的定义方式, 相应的测量方法、取值也都不尽相同<sup>[29]</sup>, 文中介绍的只是其中一种。

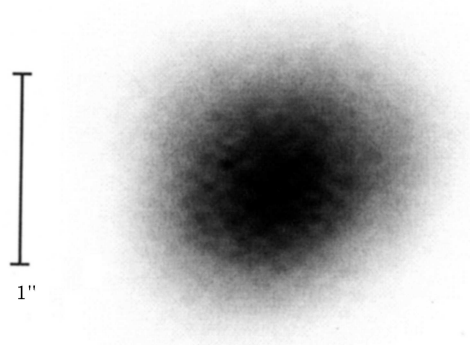


图 2 云南天文台获取的长曝光图像 (ADS11344)<sup>[11]</sup>

## 2.2 斑点图的计算机模拟

借助计算机可以通过模拟的方式生成大量的天体目标斑点图, 这些模拟数据可用于分析斑点图的处理方法。邱耀辉、吕瑞宁等人曾经在 1992 年介绍过利用实测的大气—望远镜综合成像系统的点扩展函数来生成天体目标斑点图的方法<sup>[31]</sup>。依据柯尔莫哥洛夫大气湍流模型, 大气对望远镜成像的影响等效于在望远镜入射光阑前附加满足一定条件的随机相位屏。杨连臣等人<sup>[32]</sup>曾经在 2000 年介绍并分析过生成满足条件的随机相位屏的方法, 并且利用这种方法生成的相位屏模拟了天体目标斑点成像过程。考虑无像差、口径 1 m 的地面光学望远镜, 观测远处的天体目标, 假定该目标可以视为点光源, 光波长为 600 nm, 无大气时观测到的图像如图 3 所示。

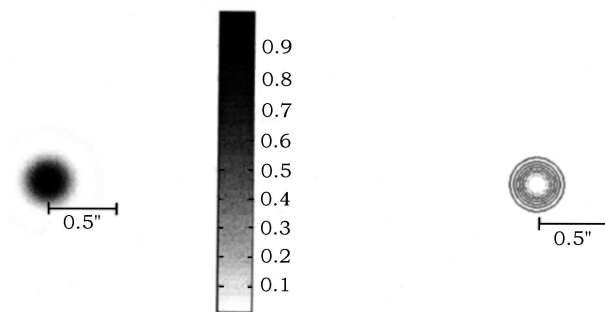


图 3 衍射受限点扩散函数

右侧为等高线图, 等高线的值由外到里依次是 0.09、0.18、0.27、0.36、0.45、0.55、0.64

当大气相干长度为 0.1 m 时,典型的斑点图如图 4 所示。

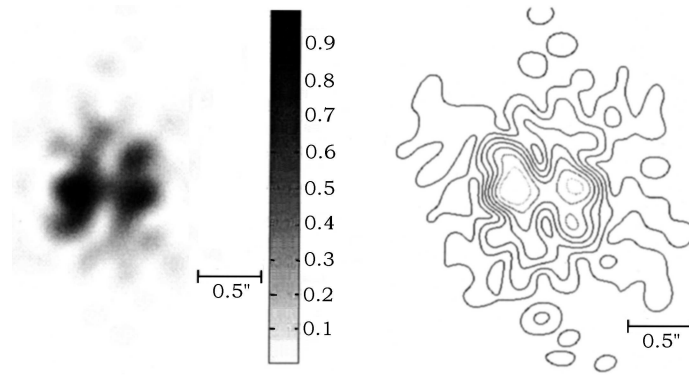


图 4 典型大气—镜综合成像系统短曝光点扩散函数

右侧为等高线图,等高线的值由外到里依次是 0.09、0.18、0.27、0.36、0.45、0.55、0.64 相同大气视宁度条件下长时间曝光取得的图像如图 5 所示。

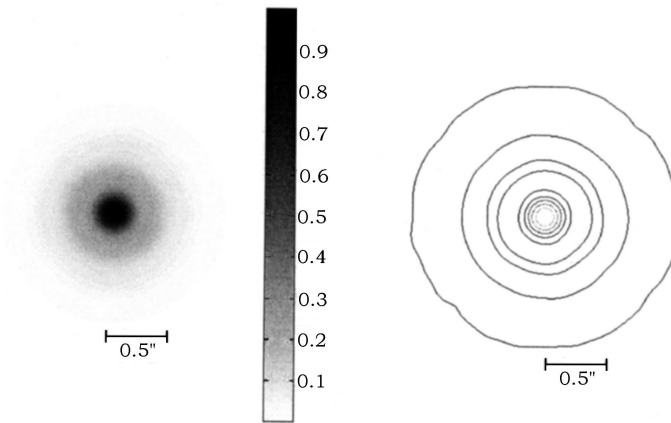


图 5 典型大气—望远镜综合成像系统长曝光点扩散函数

右侧为等高线图,等高线的值由外到里依次是 0.09、0.18、0.27、0.36、0.45、0.55、0.64、0.73、0.82

### 3 斑点图的频率域重建方法

对图像做傅里叶变换,将图像变换至频率域。频率域的信号又可以被分离为模与相位。受大气抖动的影响,不论是模还是相位,都会掺杂噪声。一般的处理方法是分别考虑模与相位,用不同的方法来除去噪声,恢复信号,然后再将结果合并为频率域的复振幅信号,最后经傅里叶逆变换得到恢复出来的图像。

下面分别介绍针对模与相位的复原方法。

### 3.1 模复原方法

#### 3.1.1 斑点干涉法

曾经有人提出, 大型望远镜因受到大气视宁度的影响而损失的观测分辨率可以通过对图像进行干涉分析来修复。这种方法可以用来直接测量一些恒星的直径。但是由于需要波前相位一致, 只能使用比较小的光瞳。这就限制了这种方法的应用场合。Labeyrie 拓展了上述方法, 称 Labeyrie 的方法为“斑点干涉方法”。

“斑点干涉法”用来恢复图像频率域复振幅的模。其基本思想是, 当曝光时间小于某一个阈值时, 图像包含比长曝光图像更多的信息。将多幅连续短曝光获取的图像变换至傅里叶频率域, 取其模, 再利用当前视宁度条件下受到扰动的成像系统自相关函数随时间的平均, 即可获得复原后的模。

这种思想就是基于斑点干涉的众多模复原方法的原理。

Labeyrie 的斑点干涉方法可以用以下衍射理论表述<sup>[4]</sup>。

令  $x$  为空间域坐标,  $f$  为频率域坐标,  $o(x)$  为有限尺度物体亮度分布,  $i(x)$  为该物体经成像系统所成图像的亮度分布,  $P(f)$  是受大气扰动的望远镜 (成像系统) 瞳函数。根据衍射理论可知, 受大气扰动的望远镜点扩展函数  $psf(x)$  与瞳函数  $p(f)$  的傅里叶变换  $p(x)$  之间存在如下关系:

$$psf(x) = |p(x)|^2 \quad (1)$$

根据成像理论, 又有:

$$i(x) = o(x) * psf(x) \quad (2)$$

其中  $*$  表示卷积运算。令  $I(f)$  和  $O(f)$  分别为  $i(x)$  和  $o(x)$  的傅里叶变换, 有:

$$I(f) = O(f) \cdot \mathcal{F}[\mathcal{F}[P(f)]^2] \quad (3)$$

其中,  $\mathcal{F}$  为傅里叶变换记号。引入自相关函数记号  $\mathcal{A}$ , 有:

$$I(f) = O(f) \cdot \mathcal{A}[P(f)] \quad (4)$$

进一步的, 有:

$$|I(f)|^2 = |O(f)|^2 \cdot |\mathcal{A}[P(f)]|^2 \quad (5)$$

考虑对同一个物体 (非相干光照) 多次曝光, 获得多幅图像, 有:

$$\sum_k |I_k(f)|^2 = |O(f)|^2 \cdot \sum_k |\mathcal{A}[P_k(f)]|^2 \quad (6)$$

即:

$$|O(f)|^2 = \sum_k |I_k(f)|^2 / \sum_k |\mathcal{A}[P_k(f)]|^2 \quad (7)$$

其中,  $\sum_k |I_k(f)|^2$  可以从观测结果中获得。通过某种方法得到  $\sum_k |\mathcal{A}[P_k(f)]|^2$  之后, 即可计算出  $|O(f)|$ , 即物体亮度分布傅里叶变换的模。

一般的, 可以通过参考星来获取  $\sum_k |\mathcal{A}[P_k(f)]|^2$ , 亦即瞳函数自相关函数的系综平均。参考星一般为不可分辨点源 (包括人造点源)。

### 3.2 相位复原方法

相位复原对天文图像重建以及主动光学中的像差校正都有重要意义。

#### 3.2.1 从单幅斑点图复原相位的方法

Rondeau<sup>[33]</sup> 等人提出了一种从单幅准确对焦的斑点图复原相位的有效算法。该算法利用全局最优化策略以及自动调谐的先验平滑度来克服局部极小值以及相位简并问题。

该算法有三个关键点: (1) 构造了罚函数  $f_{ML}(G, \phi)$  (其中  $G$  是模,  $\phi$  是待定相位); (2) 引入先验估计函数  $f_{\text{prior}}(G, \phi)$ ; (3) 设计了全局最优化策略。

数据 (观测数据或者复原过程中数据) 可分离为模型与噪声两部分:

$$g = m + n \quad (8)$$

其中  $g$  是数据,  $m$  是模型,  $n$  是噪声。罚函数的定义为数据 (观测数据或者复原过程中数据) 与模型之间的差距:

$$f_{ML} = \frac{1}{2}(d - m)TC_n^{-1}(d - m)$$

其中  $C_n = \langle n \cdot n^T \rangle$  是噪声协方差矩阵。

先验估计函数为:

$$f_{\text{prior}} = \frac{1}{2}\phi^T C_\phi^{-1} \phi \quad (10)$$

实际最优化的判据为:

$$f = f_{ML} + \mu f_{\text{prior}} \quad (11)$$

其中  $\mu > 0$  是与贝叶斯框架中先验估计有关的超参数。

该算法使用了特定策略可以实现全局最优化。首先选择适当的阈值  $f_{ML}^{\min}$ , 然后再选择随机的初始值进行局域最优化。如果罚函数很快就减小到阈值以下则继续进行最优化, 否则重新选择随机的初始值, 重新开始局域最优化。局域最优化可以通过牛顿法等方法来实现。

#### 3.2.3 由模复原相位的方法

Fienup<sup>[6]</sup> 修改了应用于电子显微镜成像的 Gerchberg-Saxton 算法, 给出通过物体傅里叶变换的模来复原相位信息的算法。这种算法最初用误差减小 (Error-reduction) 方法进行最优化, 后来为了获得加速收敛或者获得更好的优化效果, Fienup 还开发了输入输出 (Input-output) 方法来进行最优化。

不论用上述哪一种方法来实现最优化, 都要用均方差来评估优化的效果。

令  $o(\mathbf{x})$  为物体亮度分布 (非相干照明),  $i(\mathbf{x})$  是重建后图像的亮度分布, 则定义均方差如下:

$$E_i^2 = \frac{\int |i(\mathbf{x}) - o(\mathbf{x})|^2 d\mathbf{x}}{\int |o(\mathbf{x})|^2 d\mathbf{x}} \quad (12)$$

由模复原相位的方法由有限次迭代过程实现, 迭代流程如下:

1. 对输入的物体亮度分布估计  $g$  进行傅里叶变换, 得到  $\mathbf{G} = \mathcal{F}[g]$ 。
2. 将  $\mathbf{G}$  分离为模与相位, 即  $\mathbf{G} = |\mathbf{G}|e^{i\phi}$ 。
3. 将  $|\mathbf{G}|$  替换为已知的物体真实亮度傅里叶变换的模  $|\mathbf{O}|$ , 得到  $\mathbf{G}' = |\mathbf{O}|e^{i\phi}$ 。
4. 对  $\mathbf{G}'$  进行傅里叶变换, 得到  $g' = \mathcal{F}^{-1}[\mathbf{G}']$ 。
5. 对  $g'$  施加约束条件, 作为下一次迭代的输入  $g$ 。

上面迭代过程中施加约束条件的步骤即用对物体的先验认识对迭代过程中的估计进行约束。最简单的约束即: 物体亮度分布应该是非负实数。令使得  $g'$  满足约束条件的自变量集合为  $\gamma$ , 误差下降 (Error-reduction) 方法施加约束条件的数学表达为:

$$g_{k+1}(\mathbf{x}) = \begin{cases} g'_k(\mathbf{x}) & \mathbf{x} \in \gamma \\ 0 & \mathbf{x} \notin \gamma \end{cases}$$

上式中指标  $k$  表示迭代次数。  $g'$  在满足前述约束条件的自变量处取值为实数 (标量), 故上式中  $g'$  与  $g$  通用。

输入输出方法以及其他优化方法与误差下降方法的区别之处就在于针对同样的约束条件使用不同的方法生成下一步迭代的输入。使用不同的迭代方法, 均方差下降的速度以及最终收敛的情况不同。

### 3.2.3 斑点掩模法

Lohmann 开发的斑点掩模法 (Speckle masking)<sup>[34]</sup> 既可以在空间域重建斑点图, 又可以作用于频率域。在频率域使用斑点掩模法, 相比于使用斑点干涉法具有一系列的优势, 其中之一就是在用斑点掩模法进行图像重建的过程中, 图像傅里叶频率的相位信息不会丢失, 因而, 人们可以用斑点掩模法来复原相位。

斑点掩模法建立在重谱 (Bispectra) 与三相关 (Triple Correlation) 的基础上。下面首先介绍重谱与三相关的概念。

3 个强度分布  $i_k(\mathbf{x})$ 、 $i_m(\mathbf{x})$  和  $i_n(\mathbf{x})$  的三相关定义如下:

$$i_{kmn}^{(3)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \int i_k(\mathbf{x}'')i_m(\mathbf{x}'' + \mathbf{x})i_n(\mathbf{x}'' + \mathbf{x}')d\mathbf{x}'' \quad (13)$$

将三相关的傅里叶变换定义为重谱, 即:

$$\mathbf{I}_{kmn}^{(3)}(\mathbf{f}, \mathbf{f}') = \int \int i_{kmn}^{(3)}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') e^{-2\pi i(\mathbf{x}\cdot\mathbf{f} + \mathbf{x}'\cdot\mathbf{f}')} d\mathbf{x}d\mathbf{x}' \quad (14)$$



令  $I_k(f)$ 、 $I_m(f)$  和  $I_n(f)$  分别为  $i_k(x)$ 、 $i_m(x)$  和  $i_n(x)$  的傅里叶变换, 有:

$$I_{kmn}^{(3)}(f, f') = I_k(f) \cdot I_m(f') \cdot I_n(-f - f') \quad (15)$$

上面引入了三相关以及重谱的定义, 下面开始具体介绍斑点掩模方法的数学表达。

$$i_n(x) = o(x) * psf_n(x)$$

指标  $n$  表示不同的斑点图。对上式进行傅里叶变换, 就得到:

$$I_n(f) = O(f) \cdot OTF_n(f)$$

根据卷积理论, 进一步得到:

$$I_n^{(3)}(f, f') = O^{(3)}(f, f') \cdot OTF_n^{(3)}(f, f')$$

实际处理过程中, 处理的对象是斑点图的系综平均:

$$\langle I_n^{(3)}(f, f') \rangle = O^{(3)}(f, f') \cdot \langle OTF_n^{(3)}(f, f') \rangle \quad (16)$$

定义式 (16) 中的  $\langle OTF_n^{(3)} \rangle$  为广义斑点掩模传递函数 (Generalized speckle-masking transfer function)。研究发现, 广义斑点掩模传递函数是实值函数, 且在望远镜截断频率 (Cut-off frequency) 以下大于 0。

这样, 可以推断出:

$$phase[\langle I_n^{(3)}(f, f') \rangle] = phase[O^{(3)}(f, f')]$$

下面讨论一维物体的亮度分布傅里叶频率相位复原。

引入离散化形式  $O_p = O(p \cdot \Delta f)$  ( $p$  为整数):

$$O_{p,q}^{(3)} = O_p \cdot O_q \cdot O_{-p-q}$$

令:

$$\begin{aligned} O_p &= |O_p| e^{i\phi_p} \\ O_{p,q}^{(3)} &= |O_{p,q}^{(3)}| e^{i\beta_{p,q}} \\ \langle I_{n,p,q}^{(3)} \rangle &= |\langle I_{n,p,q}^{(3)} \rangle| e^{i\beta_{p,q}} \end{aligned}$$

再引入变量  $r = p + q$ , 有:

$$e^{i\phi_r} = e^{i(\phi_q + \phi_{r-q} - \beta_{r-q,q})} \quad (17)$$

上式中  $p$  和  $q$  的取值都是整数, 又因为重谱具有对称性, 只需要考虑  $(p, q)$  所在平面的  $1/8$ , 即  $\{(p, q) | p \geq 0, p \geq q, p \in \mathbb{Z}, q \in \mathbb{Z}\}$ .

由于  $\mathbf{O}_p$  是厄米矩阵, 故:

$$\phi_0 = 0 \quad (18)$$

不考虑重建图像的绝对位置, 故令:

$$\phi_1 = 0 \quad (19)$$

这样, 得到递推公式:

$$e^{i\phi_r} = \begin{cases} \frac{2}{r-1} \cdot \sum_{0 < q \leq r/2} e^{i(\phi_q + \phi_{r-q} - \beta_{r-q,q})}, & r \in \{2k+1 | k \in \mathbb{Z}\} \\ \frac{2}{r} \cdot \sum_{0 < q \leq r/2} e^{i(\phi_q + \phi_{r-q} - \beta_{r-q,q})}, & r \in \{2k | k \in \mathbb{Z}\} \end{cases} \quad r = 2, 3, \dots, N \quad (20)$$

以上是一维物体亮度分布傅里叶频率相位信息的复原方法, 该方法可以扩展到实际工作中更为一般的二维情形。仅当四维重谱(二维物体)计算所需内存无法满足时, 可以用以下的替代方案: 根据  $i_n(\mathbf{x})$  推出一维投影  $t_n(x, \alpha_i)$  ( $\alpha_i$  是从 0 到  $\pi$  的投影角), 然后处理  $t_n(x, \alpha_i)$ , 得到物体真实亮度分布在各个投影角下的投影, 最后推出物体真实亮度分布。

另外, 刘忠等人<sup>[35]</sup>认为, 为了消除由大气视宁度产生的观测误差, 以及由探测系统引入的光子噪声、附加噪声和其他非线性因素产生的复杂误差, 尽管采取了各种非常有效的手段, 但是最终得到的目标谱中仍然不可避免地存在着剩余误差。所以刘忠等人在实际工作中使用了 Hofmann 等人提出的非线性最小二乘法。

Hofmann 和 Weigelt<sup>[36]</sup>对曾经用于射电干涉领域的网格拟合(Gridfit)方法进行推广, 从物体重谱以及其他傅里叶频率域数据中重建衍射受限分辨率图像。这种方法被称为积木法(building blocks method), 是一种迭代的最小二乘算法。

考虑非相干光源成像的情况, 任何物体的强度分布  $o_k(\mathbf{x})$  都可以用许多取值为正且完全相同的点扩展函数  $psf(\mathbf{x})$  之和来描述:

$$o_k(\mathbf{x}) = \sum_{m=1}^k psf(\mathbf{x} - \mathbf{x}_m) \quad (21)$$

上式中  $\mathbf{x}_m$  表示第  $m$  个点扩展函数的位置,  $k$  是点扩展函数的总数。这样, 图像  $o_k(\mathbf{x})$  就如同由许多完全相同的积木(点扩展函数)搭建的一样。使用积木法, 物体的高分辨率图像由大量积木逐步迭代搭建而成。

第 1 步迭代只要在任意位置放置一块积木即可完成, 因为重谱中并不包含物体的位置信息(即平移不变性)。第  $k+1$  步迭代通过在第  $k$  步迭代的输出图像  $o_k(\mathbf{x})$  的位置  $\mathbf{x} = \mathbf{x}'$  处增加一块积木  $psf(\mathbf{x})$  完成, 进而输出图像  $o_{k+1}(\mathbf{x})$ , 即:

$$o_{k+1}(\mathbf{x}; \mathbf{x}') = o_k(\mathbf{x}) + psf(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \quad (22)$$

坐标  $\mathbf{x}'$  的选取是通过最小化第  $k+1$  步迭代中如下定义的加权距离函数实现的:

$$d_{k+1}(\mathbf{x}') = \int |w(\mathbf{u}, \mathbf{v})[\mathbf{O}_{k+1}^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{v}; \mathbf{x}') - \mathbf{I}^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{v})]|^2 d\mathbf{u}d\mathbf{v} \quad (23)$$

其中,  $\mathbf{x}, \mathbf{x}'$  是空间域二维向量,  $\mathbf{u}, \mathbf{v}$  是傅里叶频率域二维向量,  $\mathbf{I}^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{v})$  是观测到的四维重谱函数,  $\mathbf{O}_{k+1}^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{v}; \mathbf{x}')$  是  $o_{k+1}(\mathbf{x}; \mathbf{x}')$  的重谱函数,  $w(\mathbf{u}, \mathbf{v})$  是权函数。如果使用 Wiener 权重滤波器作为此处的权函数, 则权函数可描述为:

$$w(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \frac{|\mathbf{O}_{k+1}^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) - \mathbf{I}^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{v})|^2}{|\mathbf{O}_{k+1}^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) - \mathbf{I}^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{v})|^2 + var[\mathbf{I}^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{v})]} \quad (24)$$

为了提高计算速度, 使用下面的方法逼近加权距离函数  $d_{k+1}(\mathbf{x}')$ :

$$d_{k+1}(\mathbf{x}') \approx d_k + \frac{6}{k} \int |w(\mathbf{u}, \mathbf{v})|^2 [\mathbf{O}_k^{(3)}(-\mathbf{u}, -\mathbf{v}) - \mathbf{I}^{(3)}(-\mathbf{u}, -\mathbf{v})] \mathbf{O}_k(\mathbf{u}) \mathbf{O}_k(\mathbf{v}) e^{2\pi i(\mathbf{u}+\mathbf{v}) \cdot \mathbf{x}'} d\mathbf{u}d\mathbf{v} \quad (25)$$

其中  $d_k$  是第  $k$  次迭代结果的重谱  $\mathbf{O}_k^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{v})$  与观测到的重谱之间的加权距离函数。

最小化  $d_{k+1}(\mathbf{x}')$  以得到  $\mathbf{x}'$  的方法不是唯一的, 最直观的方法是对取值范围内的自变量逐一搜索。一旦确定了使得  $d_{k+1}(\mathbf{x}')$  取最小值的自变量  $\mathbf{x}'_{\min}$ , 就可以在此位置添加第  $k+1$  块积木, 输出新的图像  $o_{k+1}(\mathbf{x})$ 。为了取得高分辨率的图像, 需要迭代多次。迭代数量取决于物体的复杂度。

修改加权距离函数的定义, 可以得到针对不同问题的积木法, 如斑点干涉方法、Knox-Thompson 方法等。

### 3.2.4 Knox-Thompson 方法

Knox 和 Thompson<sup>[5]</sup> 提出在对图像信息进行平均的处理过程中, 通过测量图像傅里叶变换的自相关统计量, 以相位差的形式保留相位信息。

设望远镜等效焦距为  $f$ , 远方物体距离望远镜  $z$ , 亮度分布为  $o(\alpha)$ , 点扩展函数为  $psf(\alpha)$ , 短时间曝光图像亮度分布为:

$$i(\mathbf{x}) = \int o(\alpha) psf(\mathbf{x} + \frac{f}{z}\alpha) d\alpha \quad (26)$$

相应地, 傅里叶变换后有:

$$\mathbf{I}(\mathbf{u}) = \mathbf{O}^*\left(\frac{f\mathbf{u}}{z}\right) \mathbf{OTF}(\mathbf{u}) \quad (27)$$

测量图像傅里叶变换的自相关统计量:

$$\langle I(\mathbf{u}_1)I^*(\mathbf{u}_2) \rangle = O^*\left(\frac{f\mathbf{u}_1}{z}\right)O\left(\frac{f\mathbf{u}_2}{z}\right)\langle OTF(\mathbf{u}_1)OTF^*(\mathbf{u}_2) \rangle \quad (28)$$

当  $\mathbf{u}_1 = \mathbf{u}_2$  时, 图像傅里叶变换中的相位信息在处理过程中丢失; 当  $\mathbf{u}_1 \neq \mathbf{u}_2$  时, 相位信息得到保留。为成功测量相位信息, 光学传递函数的自相关统计量  $\langle OTF(\mathbf{u}_1)OTF^*(\mathbf{u}_2) \rangle$  的值必须显著地大于噪声水平。事实上, 光学传递函数在任意一对点  $\mathbf{u}_1$ 、 $\mathbf{u}_2$  上取值的自相关统计量都显著大于噪声, 因为传递函数在  $\mathbf{u}_1$ 、 $\mathbf{u}_2$  上的取值之差相比于  $\langle OTF(\mathbf{u}) \rangle$  来说是小量。

设:

$$O\left(\frac{f\mathbf{u}}{z}\right) = \left|O\left(\frac{f\mathbf{u}}{z}\right)\right| e^{i\theta\left(\frac{f\mathbf{u}}{z}\right)} \quad (29)$$

则有:

$$\frac{\langle I(\mathbf{u}_1)I^*(\mathbf{u}_2) \rangle}{\langle I(\mathbf{u}_1)I^*(\mathbf{u}_1) \rangle} \frac{\langle OTF(\mathbf{u}_1)OTF^*(\mathbf{u}_2) \rangle}{\langle OTF(\mathbf{u}_1)OTF^*(\mathbf{u}_1) \rangle} = e^{i[\theta\left(\frac{f\mathbf{u}_2}{z}\right) - \theta\left(\frac{f\mathbf{u}_1}{z}\right)]} \quad (30)$$

用这种方法, 可以确定整个傅里叶变换域上任意两个相邻点间的相位差。任意点的相位就可以通过对从该点到原点的所有相位差求和来确定。

## 4 斑点图的空间域重建方法

### 4.1 LWH 方法

Lynds 等人<sup>[10]</sup> 提出由斑点图重建物体真实图像的 LWH 方法。

经观察发现, 斑点图中不同斑点之间尽管有差异, 但是形状大体相似。于是考虑用  $f(\mathbf{x})$  表示归一化斑点亮度分布的系综平均,  $g_i(\mathbf{x})$  表示第  $i$  个斑点亮度分布函数与系综平均的差异,  $\mathbf{a}_i$  为第  $i$  个斑点重心的坐标,  $c_i$  为该斑点强度权重。

考虑未分解的光源, 用  $i_p(\mathbf{x})$  来表示受大气扰动成的斑点像亮度分布,  $\delta(\mathbf{x})$  表示单位脉冲函数 (或狄拉克函数, 亦即 Dirac Delta Function), 则有:

$$i_p(\mathbf{x}) = \sum_i \{c_i \delta(\mathbf{x} - \mathbf{a}_i) * [f(\mathbf{x}) + g_i(\mathbf{x})]\} \quad (31)$$

令:

$$\Delta(\mathbf{x}) = \sum_i c_i \delta(\mathbf{x} - \mathbf{a}_i) \quad (32)$$

改写上式, 得到:

$$i_p(\mathbf{x}) = \Delta(\mathbf{x} - \mathbf{a}_i) * f(\mathbf{x}) + h(\mathbf{x}) \quad (33)$$

其中,  $h(\mathbf{x})$  在一般情况下是一个缓慢变化量, 表示某种背景噪声。

令  $i(\mathbf{x})$  为更为一般的有限尺度扩展源受大气扰动成像的亮度分布,  $o(\mathbf{x})$  为源物体本身的亮度分布, 则有:

$$i(\mathbf{x}) = \Delta(\mathbf{x}) * f'(\mathbf{x}) + h'(\mathbf{x}) \quad (34)$$

其中  $f'(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) * o(\mathbf{x})$ ,  $h'(\mathbf{x})$  与  $h(\mathbf{x})$  性质相似。

LWH 方法就是以式 (33) 和式 (34) 作为出发点进行图像重建的。

首先需要对每一张斑点图进行预处理。第一步, 去除不必要的低频成分, 这样这些信息就不会出现在接下来的傅里叶变换中。去除的方法是用二维高斯函数拟合斑点图, 之后将拟合的结果从原斑点图中扣除。第二步, 去除边缘效应带来的伪高频成分。方法是强制令边缘区域的数据为零。最后, 在傅里叶域用优化的低频滤波器处理每一幅斑点图。此处滤波器的作用是最小化不同光源表面噪声带来的影响, 从而可以用相对简单的算法定位每个斑点的重心, 即序列  $\{a_i\}$ 。

然后确定每一个斑点的强度权重。规定权重正比于斑点的强度, 但是强度小于每一幅斑点图中最大强度 10% 的一律置权重为零。这样就确定了序列  $\{c_i\}$ 。

至此, 得到了  $\Delta(\mathbf{x})$ 。

考虑下式:

$$\Delta(\mathbf{x}) * \Delta(\mathbf{x}) = A\delta(0, 0) + C \quad (35)$$

其中  $A$  为常数,  $C$  为交叉相乘项。一般, 交叉相乘项距离中心的  $\delta$  函数足够远, 因此不会对结果造成太大的影响。

这样, 可以用乘法运算来消卷积, 方法是用  $\Delta(\mathbf{x})$  分别对式 (33) 和式 (34) 做卷积, 得到  $f(\mathbf{x})$  和  $f'(\mathbf{x})$  的近似。其中, 对  $f(\mathbf{x})$  的近似估计考虑为对成像系统点扩展函数的估计, 而对  $f'(\mathbf{x})$  的估计则可视作为对物体真实亮度分布的重建。

对每一幅斑点图都进行上述处理, 将得到一系列  $f(\mathbf{x})$  与  $f'(\mathbf{x})$  的近似估计。将这些估计结果取平均, 可以提高信噪比, 进而作为最终结果。最终结果中还是会包含  $f(\mathbf{x})$  (等效为点扩展函数) 带来的模糊效应, 但是如果对源的观测恰当, 且源本身尺度足够大, 大量平均后的重建图像还是可以作为对源的有效估计。

## 4.2 迭代位移叠加

刘忠等人<sup>[11]</sup>认为, 简单位移叠加法 (Simple shift-and-add) 和加权位移叠加法 (Weighted shift-and-add) 等空间域的方法都存在关键性的问题: 没有找到正确的位移叠加数据点。

以简单位移叠加法为例, 位移叠加的数据点是斑点图中强度最大值所在的点。将所有的斑点图都参照其各自强度最大值所在点的坐标进行平移, 然后将平移过的图叠加。叠加不同观测的结果, 是为了增强信噪比; 对不同的斑点图都进行平移, 是因为不同观测结果中目标像的位置不同, 希望通过平移来消除不同斑点图之间目标像位置的差异。以斑点图的强度最大值

所在的点作为平移操作的参考点, 是基于一个假设, 即, 斑点图强度最大值所在的点与目标像强度最大值所在的点重合。但这个假设并不总是成立。只有当斑点图中所有的斑点彼此间间隔足够远时, 上述的两个点才“恰巧”重合。

刘忠等人基于一个简单的事实开发了迭代位移叠加法 (Iterative shift-and-add, 简称 ISA 方法), 即, 有限尺度的目标的自相关最大值位置与目标本身具有固定、确切的几何关系。如果将目标自相关最大值所在的点作为平移操作的参考点, 就能够保证平移斑点图时将斑点图都对准于目标像上的同一个点。通过大量实验发现, 可以通过下面的步骤来实现迭代位移叠加法:

(1) 对目标结构进行初估计, 得到  $o_0(\mathbf{x})$ , 有很多方法可以实现这一点, 如简单位移叠加法、斑点干涉法等;

(2) 将每一幅斑点图  $i_k(\mathbf{x})$  依次与  $o_0(\mathbf{x})$  计算相关, 得到计算结果  $c_{k,0}(\mathbf{x})$ ;

(3) 依次寻找  $c_{k,0}(\mathbf{x})$  中最大值的位置  $\mathbf{x}_{m,k}$ ;

(4) 平移  $c_{k,0}(\mathbf{x})$ , 使得最大值均位于中央;

(5) 将平移过的相关计算结果, 亦即  $c_{k,0}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{m,k})$  叠加起来, 作为对目标结构的新的估计  $o_1(\mathbf{x})$ ;

(6) 将第 5 步的输出作为第 2 步的输入, 返回第 2 步, 这样可以迭代获取对目标结构一系列的估计  $o_i(\mathbf{x})$ , 当  $\|o_{i+1}(\mathbf{x}) - o_i(\mathbf{x})\|$  小于给定的阈值时终止迭代, 输出  $o_{i+1}(\mathbf{x})$  作为对目标结构的最终估计。

上述步骤中判断迭代是否终止的判据是“相邻迭代结果之间距离是否小于给定阈值”<sup>[11]</sup>。而这里的“距离”并没有给出明确的定义。不妨将此处的距离理解为矩阵的某种范数 (上面的  $\|\cdots\|$  定义为矩阵的求范数运算)。

可以用如下的伪代码来简单、清晰地描述上述步骤 (假定使用前文介绍的 LWH 方法获取对目标结构的初估计):

$$o_p(\mathbf{x}) = LWH[i_k(\mathbf{x})]$$

**repeat**

$$c_k(\mathbf{x}) = correlation[i_k(\mathbf{x}), O_p(\mathbf{x})]$$

$$\mathbf{x}_{m,k} = find\_max[c_k(\mathbf{x})]$$

$$o_q(\mathbf{x}) = sum[c_k(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{m,k}), k]$$

$$d = max[o_p(\mathbf{x}) - o_q(\mathbf{x})]$$

**until**  $d \leq d_m$

最后, 用上面的步骤对点源进行处理, 得到迭代位移叠加法的点扩展函数, 就可以用于目标估计结果的消卷积。

## 5 盲消卷积类的图像重建方法

一般来说目标图像  $o(\mathbf{x})$ 、点扩展函数  $psf(\mathbf{x})$  以及观测结果 (如斑点图)  $i(\mathbf{x})$  之间存在如下的卷积关系 (前提是成像系统具有线性平移不变性):

$$i(\mathbf{x}) = psf(\mathbf{x}) * o(\mathbf{x})$$

前述的斑点成像技术多数是通过首先获取对卷积运算中的点扩展函数  $psf(\mathbf{x})$  的估计, 然后用消卷积 (Deconvolution) 的方法反解出目标图像  $o(\mathbf{x})$ 。但从这个思路出发的方法需要对点扩展函数估计得足够精确, 否则无法得到对目标图像的正确重建。

Lane 和 Bates<sup>[37]</sup> 演示了在不知道点扩展函数的情况下通过消卷积方法反解出目标图像的理论上的可行性。这种在不知道参与卷积运算的两项中任何一项的情况下, 反解出两项的方法被称为盲消卷积 (Blind deconvolution)。用他们的算法可以成功地从模拟数据中反解出点扩展函数与目标图像。但是一旦使用真实的观测数据, 消卷积过程就无法克服误差带来的问题。

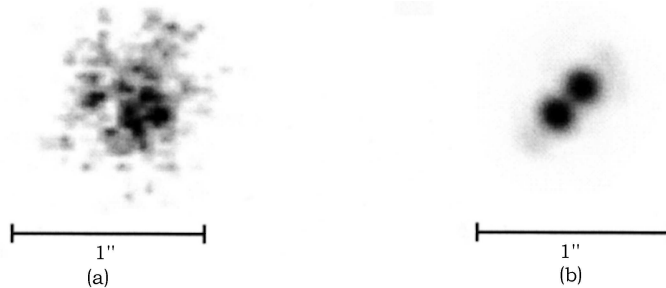


图 6 云南天文台使用 ISA 方法重建 ADS16800 图像

(a) 为斑点图, (b) 为重建结果<sup>[11,30]</sup>

Ayers 和 Dainty 提出<sup>[38]</sup> 可以处理含有噪声的数据的实际算法。他们使用了具有物理意义的约束条件: 目标图像与点扩展函数的卷积非负。但是他们的方法无法处理含有较多噪声的观测结果, 这时迭代过程会变得不稳定。

Davey 对 Ayers 与 Dainty 的方法做出了改进<sup>[39]</sup>, 他在迭代过程中使用了维纳滤波器, 并且用包含更多信息的支撑约束替代了非负约束。这样, Davey 的方法就可以用来处理真实的观测结果。

Holmes 依照泊松统计使用最大似然方法实施了盲消卷积<sup>[12]</sup>。在 Holmes 的算法中, 每一步迭代都有两次类似 Lucy-Richardson 消卷积的过程连续出现。这样就可以严格施加非负约束。Holmes 同样也研究了其他约束 (如对称性约束、点扩展函数带宽约束等) 的效果。

Schulz 针对因介质扰动质量下降的观测结果改进了 Holmes 的方法<sup>[13]</sup>。在 Schulz 的方法中, 使用了更多的约束, 如相位误差。另外, Schulz 还使用了点扩展函数不同的多幅观测结果

来复原相同的目标图像。

Lane 又提出了通过最小化罚函数来进行盲消卷积的方法<sup>[40]</sup>。他用罚函数来描述观测结果  $i(x)$  与消卷积结果  $o(x)$ 、 $psf(x)$  之卷积的偏差, 同时还用罚函数来描述消卷积结果对非负约束以及可能的支撑约束的破坏。这样成像过程的卷积关系以及含有物理意义的约束条件就都可以通过最小化罚函数来逐步逼近。这种思路被随后的很多方法沿用和发展。

Thiébaud 在最大似然方法的基础上又加入了先验估计约束, 同时又采用了 Lane 提出了最小化罚函数的优化过程, 进一步改进了盲消卷积方法<sup>[14]</sup>。这种方法既有 Holmes 的方法的严密特点, 又具备 Lane 的方法的灵活性, 使用这种方法对斑点图进行重建, 允许观测结果中包含更多的噪声。此外, 对这种方法加以修改, 就可以利用测得的点扩展函数信息来帮助获得更好的图像重建结果, 这样, 这种方法就可以用来解决更为一般的消卷积问题, 而非仅仅解决盲消卷积问题。

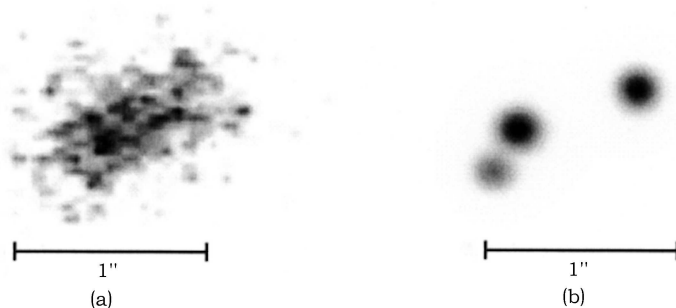


图7 云南天文台使用 ISA 方法重建 ADS11344 图像  
(a) 为斑点图, (b) 重建结果<sup>[11]</sup>

Xu 提出最大后验估计的盲消卷积方法<sup>[17]</sup>。根据贝叶斯定理, 存在两种可能的估计——最大似然估计和最大后验估计。Holmes 的方法基于最大似然估计, Xu 的方法则是基于最大后验估计。最大后验估计可以看作是对最大似然估计的正则化。Xu 使用了非高斯 — 马尔可夫随机场进行了正则化, 而是使用了休伯 — 马尔可夫随机场模型 (Huber-Markov random-field model)。Xu 的方法一方面可以有效地降低重建结果的噪声水平, 另一方面也可以有效减少重建人为产生的结构。

## 6 国内在该领域的相关工作

### 6.1 云南天文台

1983 年云南天文台组建了天文新技术实验室<sup>[41]</sup>, 从 1984 年开始天文高分辨率成像研究工作。

1984—1987 年云南天文台研究斑点干涉法, 建立了现代光学实验室, 研制了用于光学方法处理的傅里叶透镜, 进行了以激光和白光为光源的人造目标和模拟大气的斑点干涉方法处



理实验,得到了目标的功率谱和自相关,还研制了国内第一台斑点干涉照相机<sup>[42]</sup>,实现了分别用胶片和 CCD 接受天文目标的斑点图资料。进行了斑点干涉方法的光学方法与计算机方法处理,得到一批双星的高分辨率信息<sup>[43]</sup>。

1988年,云南天文台开始进行斑点掩模法的研究。进行了大量人造目标斑点掩模法像复原计算机模拟实验和实际天文目标的像复原实验,掌握了原理,编制了计算机处理软件。之后又研制成型了新型斑点像探测系统,为实现高分辨率像复原提供了数据保证。

对应于中、低亮度目标和光子计数模式,目标的斑点图呈现为离散的光子事件,称为“光子噪声”,同时存在着严重的离散的探测器附加噪声事件,此外,还有更复杂的其他噪声。云南天文台的科研工作者研究了三种噪声混杂的情况,并提出了具有物理意义的正性约束方法,来有效去除噪声<sup>[44]</sup>。用这种方法处理了一批双星和三星观测结果,获得了非常好的复原结果,这在国际上还是首次。

用斑点掩模法复原目标像傅里叶频率的相位时,可能存在 $2\pi$ 的不确定度,这一现象称为相位缠绕。云南天文台的工作者采用相位复矢量的形式来对目标的傅里叶频率相位进行递推,从而避免了相位缠绕。

在使用积木法消除各种误差时,需要的计算量非常大,因为这种方法是反复迭代的过程。云南天文台的工作者对这种方法进行了优化,通过分析目标像所在的位置和范围<sup>[35]</sup>,使得计算只在一个适当的局域内进行,使得计算量大大减少。

此外,云南天文台还进行了斑点全息术方面的研究<sup>[31,43,45]</sup>。刘忠等人<sup>[11]</sup>提出的迭代位移叠加法是空间域天体目标像复原的斑点图处理方法,具有信噪比高、动态范围宽的特点。

## 6.2 其他科研机构 and 科研工作者

中国科学院光电技术研究所的杨连臣等人<sup>[32]</sup>根据大气湍流的统计特性规律,对孔径为1.5 m 望远镜的随机相位屏的产生以及望远镜成像特性进行了模拟。对相位屏的方差、低频特性进行了有效控制和改善。用大气的结构函数和大气望远镜的散斑传递函数两种方法对随机相位屏的光学特性进行了评估。这些工作有助于理解大气湍流影响地面光学望远镜成像的机制。随后,罗林、沈忙作<sup>[18]</sup>又提出了在有像差的光学系统中,应用斑点成像消除像差影响的方法。通过在光学系统的光路中引入随机相位屏,采集目标的短曝光图像,用斑点成像处理,以恢复目标图像的功率谱和相位谱,最终得到目标的近衍射极限图像。

## 7 近年来应用斑点图重建方法取得的科学成果

近年来,利用斑点图重建技术在原有观测设备的基础上对一些天文目标取得了新的认识。这些成果涉及到天文学、天体物理学、太阳物理学等多个领域。使用斑点图重建方法,具有三方面的优势:(1)可以使用大量的地面光学望远镜的观测结果;(2)可以降低对观测设备的要

求; (3) 可以获取高分辨率图像。

由于双星系统目标的结构简单, 利用斑点图重建技术对双星系统的观测以及研究所取得的成果尤为显著。基于空间探测器的天体测定的兴起使得斑点成像在双星系统研究领域继续保持活力。这是因为, 利用空间探测器的测距结果可以更好地从天体的轨道学、光度学参数获取其物理参数 (如质量、光度); 另一方面, 可以用空间探测器来发现未知的双星系统, 进而使用地面观测设备通过斑点成像技术来加以区分。

Horch 等人从 1996 年开始<sup>[23]</sup> 利用斑点成像技术进行双星系统的研究。通过这些研究工作涉及到用于双星系统观测的设备与方法<sup>[25,46-48]</sup>、观测结果<sup>[49-52]</sup> 以及结果的处理<sup>[20,53]</sup>。目前, 通过架设在基特峰国家天文台 (Kitt Peak National Observatory) 的 WIYN 3.5m 望远镜配合 RYTSI (Rochester-Yale Tip-tilt Speckle Imager, 罗切斯特-耶鲁倾斜斑点成像器, 一种新型斑点照相机) 获取目标的斑点图, 使用斑点成像技术, 能够以超过衍射极限的分辨率区分双星系统。

Caloi 借助斑点图重建方法, 使用小型天文光学望远镜对一些列双星系统进行观测, 并通过普通的网络摄像头获取观测结果, 使用膝上型计算机对观测结果进行处理, 最后估算出双星系统的参数<sup>[54]</sup>。

Zakharov 通过斑点成像技术<sup>[28]</sup> 重建了使用 1 m 瑞典太阳望远镜观测得到的太阳黑子数据, 得到连续图像的时间序列。使用这些图像, 可以确定太阳黑子周围半影日珥的固有运动及其速度和磁性结构。研究结果揭示了太阳黑子周围的半影日珥中存在强烈的水平方向磁场的对流卷, 这些对流卷被日珥包络的更强的垂直方向的磁场分隔开。

Kuwamura 等人<sup>[55]</sup> 应用位移叠加方法对通过地面光学望远镜获取的斑点图进行重建, 得到了 Io (木星的卫星之一) 的图像。随后又将上述图像与通过空间探测器获取的图像进行比较, 比较的结果显示使用斑点图重建方法获取了分辨率较好的 Io 表面结构特性。

## 8 小 结

前文介绍了天体目标斑点图的获取与为了复原天体目标的斑点图处理方法, 傅里叶频率域的方法出现较早, 但是实现过程较为复杂。因而出现了空间域的方法, 试图只在空间域处理斑点图数据, 简化斑点图的处理方法。斑点掩模法是傅里叶频率域比较成功的方法, 用这种方法能得到高分辨率复原像, 而且也有较为完备的理论支持。正是因为这样, 斑点掩模法的基础 (重谱分析) 也被应用于更为广泛的领域, 而不单单是天体目标的像复原领域。但是相对于其他方法, 斑点掩模法由于是一种高阶统计方法, 涉及到的计算也比较复杂, 尤其是用非线性最小二乘法来消除噪声时更是如此。作者认为, 当今最优化领域的一些优秀的优化方法有可能应用于上述计算过程, 来提高像复原计算的效率。

**致谢** 本论文得到国家自然科学基金(10603004)资助;同时也获得国家重点基础研究发展计划(973)资助(2009CBB24800);本论文利用了清华大学天体物理中心开发运行的集成化天体物理研究平台;本论文还使用了云南天文台拍摄的图像以及重建结果。

### 参考文献:

- [1] 仇朴章. 天文学进展, 1989, 7(1): 328
- [2] Kolmogorov A. Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1941, 30: 301
- [3] 周仁忠, 阎吉祥. 自适应光学理论. 北京: 北京理工大学出版社, 1996: 1
- [4] Labeyrie A. A&A, 1970, 6(1): 85
- [5] Knox K T, Thompson B J. ApJ, 1974, 193: 45
- [6] Fienup J R. Optics Letters, 1978, 3(1): 27
- [7] Gezari D Y, Labeyrie A, Stachnik R V. ApJ, 1972, 173: L1
- [8] Dainty J C. Laser Speckle and Related Phenomena. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1984: 1
- [9] Bates R H T, Cady F. M. Optics Communications, 1980, 32: 365
- [10] Lynds C R, Worden S P, Harvey J W. ApJ, 1976, 207: 174
- [11] Liu Zhong, Qiu Yaohui, Lu Ruwei. Electronic Imaging and Multimedia Systems II, SPIE., Volume 3561, 1998: 326
- [12] Holmes T J. Journal of the Optical Society of America A, 1992, 9: 1052
- [13] Schulz T J. Journal of the Optical Society of America A, 1993, 10: 1064
- [14] Thiébaud E, Conan J M. Journal of the Optical Society of America A, 1995, 12(3): 485
- [15] Zhang Jianlin, Zhang Qiheng, He Guangming. Optics Letters, 2008, 33(1): 25
- [16] Zhang J-L, Zhang Q-H, He G-M. Journal of the Optical Society of America A, 2008, 25(3): 710
- [17] Xu Z, Lam E Y. Optics Letters, 2009, 34: 1453
- [18] 罗林, 沈忙作. 光电工程, 2005, 32(10): 47
- [19] 林京, 刘忠, 金振宇. 天文研究与技术 — 国家天文台台刊, 2004, 1: 188
- [20] Davidson J W Jr., Baptista B J, Horch E P, et al. AJ, 2009, 138: 1354
- [21] Horch E. International Journal of Imaging Systems Technology, 1995, 6: 401
- [22] Horch E P. Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, 2006, 25: 79
- [23] Horch E P, Dinescu D I, Girard T M, et al. AJ, 1996, 111: 1681
- [24] Horch E P, Franz O G, van Altena W F. AJ, 2006, 132: 2478
- [25] Horch E P, Veillette D R, Gallé R B, et al. AJ, 2009, 137: 5057
- [26] Osterbart R, Balega Y Y, Blöcker T, et al. A&A, 2000, 357: 169
- [27] Raban D, Jaffe W, Röttgering H, et al. MNRAS, 2009, 394: 1325
- [28] Zakharov V, Hirzberger J, Riethmüller T L, et al. A&A, 2008, 488: L17
- [29] Kellerer A, Tokovinin A. A&A, 2007, 461: 775
- [30] 邱耀辉, 刘忠, 卢汝为等. 光学学报, 2001, 21(2): 186
- [31] 邱耀辉, 吕瑞宁, 钱莘等. 云南天文台台刊, 1992, 16(2): 48
- [32] 杨连臣, 沈忙作, 郭永洪. 光子学报, 2000, 29: 1108
- [33] Rondeau X, Thiébaud E, Tallon M et al. Journal of the Optical Society of America A, 2007, 24(10): 3354

- [34] Lohmann A W, Weigelt G, Wirtzner B. *Applied Optics*, 1983, 22(24): 4028
- [35] 刘 忠, 邱耀辉, 楼 柯等. *光学学报*, 1999, 19(7): 935
- [36] Hofmann K H, Weigelt G. *A&A*, 1993, 278(1): 328
- [37] Lane R G, Bates R H T. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, 4(1): 180
- [38] Ayers G R, Dainty J C. *Optics Letters*, 1988, 13: 547
- [39] Davey B L K, Lane R G, Bates R H T. *Optics Communications*, 1989, 69: 353
- [40] Lane R G. *Journal of the Optical Society of America A*, 1992, 9: 1508
- [41] 季凯帆, 刘 忠, 岑学奋. *云南天文台台刊*, 1997, 21(3): 36
- [42] 李克坚, 钱 苹. *天文文献情报*, 1989, 2(3): 30
- [43] 邱耀辉, 刘 忠, 楼 柯等. *光学学报*, 1999, 19(2): 151
- [44] 刘 忠, 邱耀辉, 楼 柯等. *天文学报*, 1998, 39(2): 217
- [45] 邱耀辉, 张瑞龙, 楼 柯等. *云南天文台台刊*, 2001, 25(1): 32
- [46] Horch E, Anderson L, DeSousa M, et al. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2009, 41: 910
- [47] Meyer R D, Horch E P, Zinkov Z, et al. *PASP*, 2006, 118: 162
- [48] Horch E P, van Altena W F, Meyer R D. *Astronomy in the Age of the Next Generation of Large Telescopes*, 2005: 90
- [49] Dank J A, Horch E P, van Altena W F, et al. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2002, 34: 655
- [50] Horch E P, Baptista B J, Veillette D R, et al. *AJ*, 2006, 131: 3008
- [51] Horch E P, Davidson J W Jr, van Altena W F, et al. *AJ*, 2006, 131: 1000
- [52] Robinson S E, Horch E P, Zinkov Z, et al. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2001, 33: 849
- [53] Horch E P, Franz O G, Wasserman L H, et al. *AJ*, 2006, 132: 836
- [54] Calloi R. *Journal of Double Star Observations*, 2008, 4: 111
- [55] Kuwamura S, Tsumuraya F, Miura N, et al. *PASP*, 2008, 120: 348

## Methods of Astronomical Image Reconstruction from Speckle Image

HUO Zhuo-xi<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Jian-feng<sup>1,2,3</sup>

(1. *Tsinghua Center for Astrophysics, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*; 2. *Key Laboratory of Particle and Radiation Imaging of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China*; 3. *Key Laboratory of High Energy Radiation Imaging Fundamental Science for National Defense, Beijing 100084, China*)

**Abstract:** This article is mainly intended to give a review of how astronomical images are reconstructed from speckle images. The speckle image formation mechanism and acquisition method are introduced and the computer simulated speckle images are demonstrated first. Then the methods of speckle image reconstruction is described, including methods in both frequency

domain and spatial domain. In the frequency part of the article, speckle interferometry for retrieving modulus information is introduced. Knox-Thompson, speckle masking and phase reconstruction from modulus for retrieving phase information are also introduced in the frequency part. LWH method and iterative shift-and-add method are introduced in the spatial part. Some methods that are based on blind deconvolution and have emerged recently are also introduced in this article. And then the research work at this field did researchers in Mainland China has been highlighted. Not only the methods of astronomical image reconstruction themselves but their applications are also introduced in the article. Some scientific achievements on astronomy, astrophysics and solar physics have been included. Research on binary star system that makes use of speckle image reconstruction takes a significant part due to the simplicity of the object. For the same reason speckle image reconstruction has been shown great power to help binary star system related research. The relevant methods are summarized at the end of the article.

**Key words:** speckle imaging; frequency domain reconstruction; spatial domain reconstruction; Blind deconvolution

\* \* \* \* \*

## 《天文学进展》2010 年征订启事

《天文学进展》创刊于 1983 年，为中国天文学会学术期刊。被收录为中国科学引文数据库来源期刊。

《天文学进展》主要刊登内容：反映国内外天文学科最新研究进展的评述性文章、高水平的科研论文、学科前沿介绍、科研简讯、专题讲座、学术活动报道。

读者对象：天文学及相关学科的科研人员、高等院校教师、研究生及具有相当天文基础知识的天文爱好者。

《天文学进展》为季刊，每季末 20 日出版，16 开本；每期定价 25 元，全年 100 元。

统一刊号：CN 31-1340/P，邮发代号：4-819，全国各地邮局均可订阅。

欢迎订阅 2010 年《天文学进展》！

《天文学进展》编辑部

2010 年 3 月