

文章编号: 0253-2239(2001)02-186-06

天文图像空域重建新方法: 迭代位移叠加法*

邱耀辉 刘 忠 卢汝为 楼 柯

(中国科学院云南天文台国家天文观测中心, 光学天文联合开放研究实验室, 昆明 650011)

摘要: 在天文斑点成像中, 基于斑点图中一个新的位移基准点——目标的自相关极大值点, 提出了一种在空间域中重建天文图像的迭代位移叠加法 (ISA 法), 它能有效地消除大气湍流影响, 实现望远镜衍射受限分辨率天文成像。在阐述了该方法的基本原理之后, 给出了一些天文目标的像复原实验。

关键词: 大气湍流; 位移基准点; 像复原

中图分类号: P123 文献标识码: A

1 引 言

受地球大气湍流的影响, 传统长曝光天体摄影术的分辨率仅取决于大气相干直径 (大气视宁度参数) $r_0^{[1]}$ 。在良好视宁度时, r_0 的平均值约为 10 cm, 实际上分辨率只有 1 角秒左右, 相当于 10 cm 口径小望远镜的分辨本领。为了消除大气湍流的干扰, 天文高分辨率斑点成像技术均采用接于望远镜终端的专用设备——斑点照相机^[2], 摄取一系列短曝光像作为重建衍射受限像的原始数据。每幅图像的曝光时间为大气相干时间 (约 10 ms)^[1], 将使大气湍流“冻结”, 得到的图像 (瞬时像) 是呈散斑状的“斑点图”, 它们含有望远镜的衍射受限分辨率信息, 是未经时间平均的随机起伏光波前在望远镜焦平面上产生的复杂干涉图样。对大量斑点图进行专门处理后可望得到天体目标的高分辨率复原像。

自 70 年代发展起来的天文高分辨率斑点成像技术, 可分为两类, 一类为像的频域重建法, 它们在傅里叶频率域中进行数据处理, 例如斑点干涉术^[3,4]、由模复原相位的方法^[5]、Knox-Thompson 法^[6]和重谱 (斑点掩模) 法^[7,8]等。由于复原相位谱的过程复杂, 计算量巨大不易被推广运用。另一类则是直接在空间域中完成像重建, 如简单位移叠加法 (SAA 法)^[9]和加权位移叠加法 (WSA 法)^[10]等, 后者的主要优点是回避了复杂的傅里叶相位复原, 数据处理比前者大为简单。但是, 由于它们存在其他的问题而不能被应用, 如简单相移叠加法有“鬼

点”问题; 加权位移叠加法对于较复杂目标难以操作等。它们的关键问题是没有找到正确的位移叠加基准点。

我们以目标的自相关极大点为位移叠加基准点, 提出了新的空域像重建方法。该点既不是用于消除波前倾斜的每幅斑点图的重心, 也不是简单相移叠加法的每幅斑点图的极大值点, 它是通过多次迭代过程使位移叠加的基准点逐步趋近于目标的自相关极大点, 由此将导致迭代终止时得到目标的高信噪比位移叠加像, 再用空域消卷积方法——CLEAN 算法处理后, 就能实现目标的高像质复原。这是一种仅在空间域中进行像复原的方法, 称之为“迭代位移叠加法” (ISA 法)。

2 迭代位移叠加法的原理

2.1 对迭代位移叠加法点扩展函数的假设

大量实际观测表明, 大气望远镜 (含斑点相机) 综合成像系统的瞬时点扩展函数, 即对一点源单星摄取的瞬时像, 由散离的众多斑点组成, 当目标 (这里为点源单星) 为高、中亮度水平时, 每个斑点的角半径约为 λ/D , λ/D 分别为光波长和望远镜的口径, 大小近似于望远镜的衍射受限点扩展函数, 即艾里斑, 众斑点分布于角半径约为 λr_0 的区域中。用于解释此现象的近似理想化模型是:

在口径为 D 的望远镜入射光瞳上分布着若干个通光口径各为 r_0 的子孔径, 形成了一个二维光栅式结构, D 为光栅长度, 光栅常数为 $2r_0$, 加之斑点相机中专门加入了窄通带滤光器^[2], 部分地消除了光栅式色散, 从而保证了通过此二维光栅后, 光的衍射干涉结果为具有清晰斑点结构的图像, 即“斑点

* 国家自然科学基金 (19873017)、中国科学院天文口基金和云南省自然科学基金 (97A014G) 资助项目。

收稿日期: 1999-08-10; 收到修改稿日期: 1999-12-01

图”, 众斑点为各级主极大, 其中存在着—未通过色散的强度值最大的 0 级主极大点^[11], 它就是点源单星的衍射受限像的信息最强点。

该模型仅仅给出了形成斑点图的光学机理, 实际情况比模型要复杂得多, 斑点的大小和分布将随 r_0 的大小依时间和空间而随机地变化着。但“斑点图”的众斑点中包含了望远镜衍射受限分辨率的信息, 而每幅斑点图中存在着一个点源单星的衍射受限像的信息最强点是确定无疑的。

由大量观测实验和上述分析表明, 对大气 - 望远镜综合系统的瞬时点扩展函数 $P_k(x)$ 可作如下理论假设: 设某时刻大气的瞬时点扩展函数为 $t_k(x)$, 望远镜衍射受限点扩展函数(艾里斑)为 $h(x)$, 则一点源单星的瞬时短曝光像(斑点图) $P_k(x)$ 可用线性空间不变成像公式表示为:

$$P_k(x) = t_k(x) \circledast h(x), \quad (1)$$

这里 \circledast 为卷积算符, 下标 k 表示第 k 时刻, x 为二维空间坐标变量, 可将 $t_k(x)$ 表示为一组强度和位置各异的 δ 脉冲之和:

$$t_k(x) = \sum_{i=1}^{N_k} a_i \delta(x + x_i), \quad (2)$$

其中 a_i, x_i 分别为第 i 个 δ 脉冲的强度和位置, N_k 为 δ 脉冲数, 设 a_{mk}, x_{mk} 分别为所有 δ 函数中的最大强度值及其位置坐标, 将其提出表示, 则有

$$P_k(x) = \left[a_{mk} \delta(x + x_{mk}) + \sum_{i=1}^{N_k-1} a_i \delta(x + x_i) \right] \circledast h(x) = a_{mk} h(x + x_{mk}) + f_k(x), \quad (3)$$

该最大强度 δ 脉冲函数与 $h(x)$ 的卷积就形成斑点图中点源单星的衍射受限像的信息最强点, 以下把它称为“最强单星衍射受限像”:

$$a_{mk} h(x + x_{mk}),$$

其中 a_{mk}, x_{mk} 分别为它的强度值及其位置坐标。

$$f_k(x) = \left[\sum_{i=1}^{N_k-1} a_i \delta(x + x_i) \right] \circledast h(x)$$

代表该斑点图的其他部分, 由以上两部分组成的 $P_k(x)$ 就是大气 - 望远镜综合成像系统的瞬时短曝光点扩展函数。由上可知 x_{mk} 代表了斑点图中最强单星衍射受限像的位置。

对上述(1)式的物理解释是: 在望远镜的近轴区内点扩展函数是相同的, 此即望远镜的空间不变性; 正常情况下, 在某时刻, 来自一点源星的光是一束平行光, 经大气湍流层传播后, 在上述的成像机理

作用下, 实际上被分解为若干束波前到达角不同的平面波, 如此形成了由离散点(各个脉冲)组成的大气瞬时点扩展函数 $t_k(x)$, 其扩散范围约为 $1''$ (角秒), 远小于望远镜的空间不变区域, 应满足线性系统空间不变卷积成像规律, 在望远镜焦平面上形成了相应的点像 $a_i \delta(x + x_i) \circledast h(x)$, 其中 a_i 和 x_i 分别为其强度和位置, 因此有(1)式成立, 它是迄今对大气 - 望远镜综合成像系统短曝光瞬时点扩展函数的一种较好的数学描述。

假设能确知瞬时短曝光点扩展函数中最强单星衍射受限像的位置 x_{mk} , 下面给出在此理想假设下迭代位移叠加法的点扩展函数的定义: 若以一点源单星的每幅斑点图中最强单星衍射受限像作为斑点图位移叠加的基准点, 将很多幅斑点图位移对后再叠加平均的结果就是迭代位移叠加法的点扩展函数, 表示为 $P_1(x)$, 它含有可辨识的信噪比很高的单星衍射受限像, 表述如下: 假设 x_{mk} 就是点源单星的每幅斑点图中最强单星衍射受限像的位置, 由(3)式, 若以 x_{mk} 为基准点, 迭代位移叠加法点扩展函数为

$$P_1(x) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N P_k(x - x_{mk}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [a_{mk} h(x + x_{mk} - x_{mk}) + f_k(x - x_{mk})] = ah(x) + g(x), \quad (4)$$

其中

$$ah(x) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a_{mk} h(x + x_{mk} - x_{mk})$$

为把每幅斑点图 $P_k(x)$ 随 x_{mk} 位移对中(位移量为 x_{mk})后产生的核(a 为平均强度值), 它就是点源单星的衍射受限像, N 为参加统计的图幅数,

$$g(x) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f_k(x - x_{mk})$$

为斑点图其他部分叠加的结果, 它是一个能量分布比单星长曝光像略为集中的圆盘。

2.2 迭代位移叠加法的假设

有了上述迭代位移叠加法的点扩展函数, 就能给出相应的迭代位移叠加法的原理。对于一般被观测的天文目标而言, 设目标的强度分布为 $O(x)$, 设某瞬时通过大气 - 望远镜综合系统的瞬时点扩展函数为 $P_k(x)$, 则此时目标瞬时像 $I_k(x)$ (目标斑点图)由 $O(x)$ 与(3)式给出的该时刻大气 - 望远镜综合系统的瞬时点扩展函数 $P_k(x)$ 的卷积得到, 且应满足线性空间不变卷积成像公式:

$$I_k(x) = O(x) \circledast P_k(x) = O(x) [a_{mk} h(x + x_{mk}) +$$

$$f_k(x)] =$$

$$O(x) * \odot a_{mk} h(x + x_{mk}) + O(x) * \odot f_k(x), \quad (5)$$

注意到 $a_{mk} h(x + x_{mk})$ 是点扩展函数中最强的单星衍射受限像——强度极大的望远镜衍射受限点扩展函数, 它与目标的卷积

$$O(x) * \odot a_{mk} h(x + x_{mk})$$

即为目标的每一幅斑点图中目标的最强衍射受限像, 它被掩蔽在斑点图的其他部分 $O(x) * \odot f_k(x)$ 中。由此可看出, 目标每幅斑点图中都存在着“目标的最强衍射受限像”, 应特别注意到的是, 它的位置仍然是 x_{mk} , 按上述迭代位移叠加法点扩展函数产生的方法, 以每幅目标斑点图 $I_k(x)$ 中的目标的最强衍射受限像(位于 x_{mk}) 为基准点进行位移叠加, N 幅目标斑点图的位移叠加结果 $I(x)$ 为:

$$\begin{aligned} I(x) &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k(x - x_{mk}) = \\ &O(x) * \odot \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N P_k(x - x_{mk}) = \\ &O(x) * \odot ah(x) + O(x) * \odot g(x) = \\ &O(x) * \odot P_1(x), \end{aligned} \quad (6)$$

即 $I(x)$ 为 $O(x)$ 与迭代位移叠加法点扩展函数 $P_1(x)$ 的卷积。上式中的 $O(x) * \odot ah(x)$ 即为位移叠加结果中目标的衍射受限分辨率像。由此可知, 用 $P_1(x)$ 对 $I(x)$ 消卷积可得到目标的高分辨率复原像 $O(x)$ 。在实际操作中 $P_1(x)$ 由观测目标近旁的一点源单星(称为“参考星”)的一系列斑点图斑, 按迭代位移叠加法原理计算得到, 以保证目标和参考星的斑点图观测处于相同的大气视宁度条件下, 从而避免消卷积时因观测期间 r_0 的差异所导致的像复原误差。

依上所述, 我们提出迭代位移叠加法的基本假设如下: 在保证所有斑点图中最强目标衍射受限像准确地对齐的条件下(与上述理想条件下以 x_{mk} 为基准点相符) 进行位移叠加就能得到含有目标高分辨率的衍射受限像的叠加结果, 再用迭代位移叠加法的点扩展函数对之消卷积就能目标高分辨率的衍射受限复原像。

2.3 迭代位移叠加法的原理

迭代位移叠加法基于如下简单的事实: 一个范围有限的目标, 其空域自相关极大点与目标自身之间有精确的固定几何关系, 若以此点为基准点进行位移叠加, 就能保证使目标像准确地对齐。经大量的实验, 我们提出如下切实可行的方法: 第一步, 获取

目标像结构的初始信息。有多种方法, 例如简单位移叠加法、或斑点干涉术等, 均可得到这样的初始信息。第二步, 将得到的初始信息与每幅目标斑点图进行互相关运算, 找出相应的相关极大点, 再分别以此点为准, 对所有斑点图进行位移叠加, 结果将是一个比初始信息更接近目标原像的新信息。这是由于这些初始信息中包含着近似目标的衍射受限像的成份, 它与目标斑点图的相关, 将得到一个接近我们希望找到的目标自相关极大点, 以此点为准将斑点图位移叠加后得到的结果将更接近目标像, 然后将它作为新的目标像信息再重复上述步骤, 如此反复迭代, 随着位移叠加的基准点逐步趋近目标的自相关极大点, 位移叠加结果将逐步趋近目标真实像。收敛的判据是近两次的结果之差小于规定值。依上述特点, 我们称这种方法为“迭代位移叠加法”。

与迭代位移叠加法具有本质上不同的是, 简单位移叠加法的位移叠加基准点是斑点图的强度最大值点(在非理想的实际情况下最大值点已非最强的目标衍射受限像点 x_{mk}), 而不是目标的自相关极大点, 这将导致一系列问题。由于斑点图的能量和形状并不是对称分布于 x_{mk} 周围的, 故 x_{mk} 显然不是斑点图的重心或几何中心, x_{mk} 也有别于斑点图的强度最大值点。下面对此进行分析。

1) 当(3) 式中的 δ 脉冲相互隔开足够的距离而使它们与 $h(x)$ 卷积的结果不发生混叠时, x_{mk} 将与点图强度最大值点精确重合。

2) 正常情况下(3) 式中的 δ 脉冲是随机分布的, 在斑点图能量集中的部分, 它们经常会连在一起, 此时由于卷积结果的随机混叠, x_{mk} 与斑点图强度最大值点重合的概率将下降。则不可避免地将出现以下问题: 其一, 对于高、中等亮度目标, 因为上述原因, 强度最大值点与 x_{mk} 之间会有一个随机的距离, 甚至是完全不同的两个点, 这将导致每幅斑点图中的衍射受限像不能精确对齐, 影响简单位移叠加法的点扩展函数的高频性质, 加大像复原的误差; 其二, 对于非点源单星的一般目标, 卷积将产生更多的混叠, 造成更严重的基准点混乱, 将在随机的位置上产生新的强度极大值点, 例如当双星目标两成员星等相近时, Hunt 等的理论分析表明^[12], 两点被选为基准点的概率相近, 这必将导致鬼点的出现。我们的实验也表明, 即使双星两成员强度相差一倍以上时, 用简单位移叠加法也会产生很明显的鬼点, 此时的位移叠加过程已不是线性系统的成像过程; 其三, 对于低亮度暗弱天文目标, 斑点图的记录将处于光

子计数探测模式, 斑点均以探测器对单个光子事件的响应形式出现, 不存在斑点的最大值, 简单位移叠加法不能使用。因此必须确立新的基准点。

因此可见, 以斑点图中强度极大值点为位移叠加基准点的简单位移叠加法的点扩展函数是有问题的, 在非理想的实际情况下, 我们给出迭代位移叠加法的点扩展函数的算法如下: 按上述迭代位移叠加法的原理, 对于一点源单星目标, 应找到其每幅斑点图中的最强的单星衍射受限像, 以它为位移叠加的基准点, 进行位移叠加的结果就是迭代位移叠加法的点扩展函数。在实际计算时可用望远镜衍射受限点扩展函数 $h(x)$ 与单星的斑点图进行互相关运算, 然后以得到的相关极大点为基准点对斑点图进行位移叠加, 结果就是迭代位移叠加点扩展函数 $P_1(x)$ 。

在认为单星斑点图中的强度极大值点就是最强的单星像的前提下, Hunt^[12] 对以强度极大值点为基准点进行位移叠加的简单位移叠加法的点扩展函数进行的理论分析表明, 其点扩展函数具有类似于斑点干涉术的点扩展函数(或光学传递函数), 它具有望远镜衍射受限分辨率。他的理论分析对于简单位移叠加法的点扩展函数的是完全适宜的。由于迭代位移叠加法排除了由噪声(如斑点间的混叠, 宇宙线干扰, 探测器奇异噪声等)产生的极大值点, 斑点图中的“强度极大值点”与我们定义的“最强单星衍射受限像”将趋于同一点, 迭代位移叠加法才真正满足了 Hunt 的理论假设, 因此迭代位移叠加法点扩展函数的信噪比远远高于简单位移叠加法的点扩展函数的信噪比, 这就决定了迭代位移叠加法具有比简单位移叠加法高得多的信噪比, 简单位移叠加法的处理过程是一种混乱的错误“成像”过程。

3 迭代位移叠加法的像复原观测实验

3.1 观测情况

观测资料的获取: 于 1995 年 7 月 31 日夜, 以云南天文台 1 米口径天文望远镜, 接于望远镜终端的斑点相机采用德国造视频 ICCD(SIM-ICCD-05/S) 为探测器, 配置 5X86PC 机钟频 133 MHz, 4.5 G 硬盘, 用 8 位 PCI 总线的 MPE1000 型图像采集卡接收 ICCD 的图像输出信号, 记录速度为 12 fram/s, 每幅为 128×128 像元斑点图。观测系统的参数和天文目标: 斑点相机的光通带为 50 nm, 中心波长 530 nm, 等效焦距为 125 m, 大气视宁度参数 r_0 约

10 cm, 每幅斑点图曝光时间为(1/50) s, 大小为 128×128 像元。

在对每个天文目标进行数千幅斑点图的观测之后, 立即对目标近旁的一点源单星——参考星进行观测, 获取数量相近的斑点图, 用于计算迭代位移叠加法的点扩展函数。观测了双星 ADS16800 斑点图 3000 幅及其参考单星斑点图 2496 幅, 图 1 为双星 ADS16800 的一幅斑点图, 图中标度为 $1''$ 空间角距。3 星 H1d(ADS16648) 斑点图 4000 幅及其参考单星斑点图 3713 幅, 图 2 为 3 星 H1d(ADS16648) 的一幅斑点图。

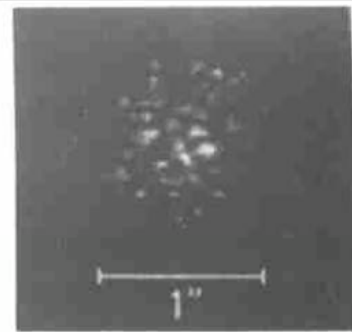


Fig. 1 A speckle image of binary ADS16800

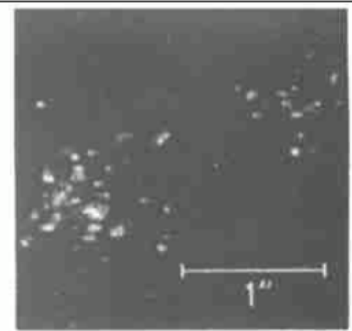


Fig. 2 A speckle image of triple H1d171(ADS16648)

3.2 用迭代位移叠加法进行像复原的数据处理步骤

1) 首先尽量消除目标和其参考星的每幅斑点图中由噪声(如宇宙线干扰)、探测器奇异噪声等产生的极大值点。

2) 用望远镜的衍射受限点扩展函数 $h(x)$ 与参考星的每幅斑点图进行互相关运算, 得到相应的相关极大点, 以此点为基准点对所有斑点图进行位移叠加, 结果就是迭代位移叠加法的点扩展函数 $P_1(x)$ 。

3) 用简单位移叠加法得到的目标强度分布的初始信息: 以目标每幅斑点图中的强度极大点为基准点进行位移叠加, 结果中就含有目标强度分布的初始信息, 提出后待用。

4) 用目标的强度分布初始信息与目标的每幅

斑点图进行互相关运算, 得到每幅斑点图中的一相关极大点, 以此点为基准点对每幅斑点图进行位移对中后, 对所有斑点图进行叠加平均, 得到的结果中含有目标强度分布的信息, 用点扩展函数 $P_1(x)$ 对之进行消卷积, 提取目标信息(消卷积的方法为 CLEAN 算法, 它仅在空间域中进行运算, 完全避开了在傅里叶频率域中的传统消卷积方法, 将在另文中加以阐述)。经消卷积后再次得到了目标强度分布的信息, 精度高于步骤 3) 得到的目标初始信息。

5) 把由步骤 4) 得到的目标强度分布的信息再与目标的每幅斑点图进行互相关运算, 再次得到每幅斑点图中的一相关极大点, 以此点为基准点对每幅斑点图进行位移对中后, 对所有斑点图进行叠加平均, 得到的结果中含有目标强度分布的信息, 其精度又将提出一步, 如此重复以上步骤, 反射迭代直到收敛。收敛的判据是两次迭代结果间的差小于规定值。通过多次迭代过程使位移叠加的基准点逐步趋近于目标的自相关极大点, 由此导致迭代终止时得到目标的高信噪比位移叠加像 $I(x)$, 再用迭代位移叠加法点扩展函数 $P_1(x)$ 经空域消卷积 CLEAN 算法消卷积就得到了目标的衍射受限像 $O(x)$:

$$O(x) = P_1(x) \circledast^{-1} I(x), \quad (7)$$

其中 \circledast^{-1} 为消卷积算符。

3.3 像复原结果

为了检验像复原的正确性, 我们特别选择了双星 ADS16800, 由于它的两个成员具有相同的光谱型(均为 F7V), 这将避免复原精度受到斑点相机中窄通带滤光器的影响, 因此它是检验像复原精度的最好天文目标。图 3 为双星 ADS16800 的复原像, 角距为 $0.17''$, 强度比为 1.00: 1.02, 与星表^[13]给出的预测数据: 角距为 $0.24''$, 强度比为 1.00: 1.00 相比, 表明强度比的复原精度已非常高, 而角距经传统的斑点干涉术和斑点掩模法像复原的验证^[8], 复原的角距 $0.17''$ 是正确的, 可作为一个重要的观测结果。

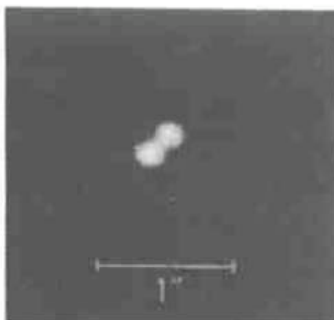


Fig. 3 The reconstructed image of binary ADS16800 by ISA

另一个目标是三星 H1d171(ADS16648)。图 4 为 3 星 H1d171(ADS16648) 复原像, 复原的 3 成员角距为 $2.26''$ 、 $0.223''$ 和 $0.15''$, 分辨率已接近 1 米望远镜的衍射受限分辨率 $0.14''$, 强度比为 1.00: 0.10: 0.10。上述星表中没有其预测值, 复原结果可作为本次的天文观测结果。上述目标均属中等亮度水平(对于 1 米口径望远镜而言), 迭代约 10 次后收敛。

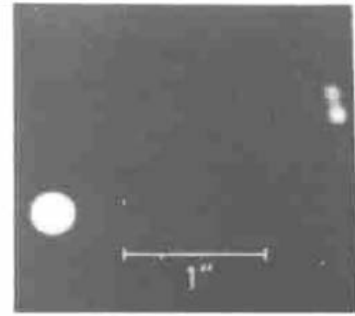


Fig. 4 The reconstructed image of triplet H1d171 (ADS16648) by ISA

也对上述两个目标进行了简单位移叠加法像复原实验, 对于目标双星 ADS16800, 由于其两成员具有几乎相同的强度, 由(5)式易于看出, 其两成员将在斑点图中产生强度相似的强度极大值点, 而简单位移叠加法以斑点图中的强度极大值为位移叠加基准点, 此二强度极大值点将以几乎相等的概率被选为强度极大值, 因而被轮流作为位移叠加基准点, 由此必然产生错误的“鬼点”。

图 5 为用简单位移叠加法得到的双星 ADS16800 的“复原”结果, 图中多了一个点, 即“鬼点”, 得到的结果与目标像相差甚远。而对目标 H1d171(ADS16648), 由于其 3 成员中之一的强度为其他两成员的 10 倍, 以此成员在斑点图中产生的强度极大值点为位移叠加基准点, 将使目标像准确地对齐, 几乎没有产生“鬼点”的可能, 得到的结果与迭代位移叠加法的结果是一致的(如图 4 所示)。上述对比实验体现了迭代位移叠加法高像质复原的优点。



Fig. 5 The result image of binary ADS16800 by ASS

结束语 由于在斑点图中以目标的自相关极大点为位移叠加的基准点, 克服了传统的位移叠加法的关键问题, 建立了新的迭代位移叠加法, 它的点扩展函数的性质决定了它是一种可以实现望远镜衍射受限分辨率的方法; 该方法的成像过程是一种满足卷积成像定律的线性系统成像过程, 具有完整的理论基础, 再配以 CLEAN 空域消卷积算法, 使其成为一种简单直观的空域像复原方法。由于上述原因, 迭代位移叠加法消除简单位移叠加法的“鬼点”问题; 逐次迭代的方法提供了寻找每幅斑点图中目标的自相关极大点的有效手段, 大量实验表明, 它是一种切实可行的方法。

与频率域像复原方法相比, 它避免了复杂的傅里叶相位谱复原, 使图像处理的计算大大简化, 所用时间大为缩短, 对上述两目标的像复原均得到了接近 1 米望远镜衍射受限分辨率(0.14") 的复原像, 具有良好的像复原效果, 像复原的质量与当前国际公认的最好方法——斑点掩模法的结果不相上下(将于另文专述)。迭代位移叠加法的上述特点, 使它成为了简单快捷、易于推广使用的天文像重建方法, 具有实现快速(准实时) 高分辨率像重建的巨大潜力。

参 考 文 献

- [1] 刘 忠, 邱耀辉. 大气质衰减参数. 云南天文台台刊, 1997, 总 69 期(3): 75~ 81
- [2] 卢汝为, 王 锋, 楼 柯等. 云南天文台新型斑点象探测系统. 云南天文台台刊, 1998, 总 72 期(1): 59~ 64
- [3] 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
- [4] 邱耀辉, 刘 忠, 楼 柯等. 斑纹全息术天文高分辨率像复原实验. 光学学报, 1999, **19**(2): 151~ 154
- [5] Fienup J R. Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform. *Opt. Lett.*, 1978, **3**(1): 27~ 29
- [6] Knox K T, Thompson B J. Recovery of images from atmospherically degraded short-exposure photographs. *Astron. J.*, 1974, **193**(1): L45~ L48
- [7] Lohmann A W, Weigelt G P, Wirtitzer B. Speckle masking in astronomy: triple correlation theory and application. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 4028~ 4037
- [8] 刘 忠, 邱耀辉, 楼 柯等. 改正重谱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] Bates R H T, Cady F M. Towards true imaging by wideband speckle interferometry. *Opt. Commun.*, 1980, **32**(3): 365~ 369
- [10] Ribak E. Astronomical images by filtered weighted shift-and-add technique. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1986, **3**(12): 2069~ 2076
- [11] 赵凯华, 钟锡华. 光学(下册). 北京: 北京大学出版社, 1994. 1~ 28
- [12] Hunt B R, Fright W R, Bates R H. Analysis of the shift-and-add method for imaging through turbulent media. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1983, **73**(4): 456~ 465
- [13] 阎林山, 储宗元, 潘大坡. 736 对目视双星历表和视轨道总表. 上海: 上海科学技术出版社, 1985. 276, 286

A New Method for Astronomical Image Reconstruction in Spatial Region: Iterative Shift-and-Add Technique

Qiu Yaohui Liu Zhong Lu Ruwei Lou Ke

(National Astronomical Observatories, United Laboratory of Optical Astronomy, Yunnan Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

(Received 10 August 1999; revised 1 December 1999)

Abstract: In astronomical speckle imaging, based on a new datum point for shifting that is the maximum value point of the autocorrelation of the object, a new astronomical image reconstruction method working in spatial region——iterative shift-and-add technique (ISA) is advanced. It can be applied to remove atmospheric turbulence influence effectively and thus the astronomical imaging with the diffraction-limited resolution of the telescope will be achieved. After describing the principle of the method, the image reconstruction experiments of some astronomical objects are given.

Key words: atmospheric turbulence; datum point to shift; image reconstruction