

doi: 10.3788/gzxb20144302.0210002

基于散斑成像技术的扩展目标高分辨率复原

任晨纲^a, 梁永辉^a, 于起峰^b

(国防科学技术大学 a. 光电科学与工程学院; b. 航天科学与工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 大气湍流对实现扩展目标的高分辨率重建具有重要影响. 针对此问题, 本文提出了一种改进的散斑成像算法. 传统散斑成像算法在相位恢复计算中存在双谱数据量大和计算复杂等问题, 改进算法利用图像的厄米特对称性和查找表技术将相位恢复和双谱计算紧密结合, 通过计算截止频率内的每个空间频率点邻域双谱和添加双谱坐标约束使得双谱数据量减小. 建立傅里叶频域相邻两象限共用的坐标查找表, 确定双谱和相位恢复计算顺序, 避免了双谱的对称操作从而使整个计算简单易行. 仿真实验结果表明: 改进算法相对于双谱截切法使得双谱数据量至少减少了 24% 并准确恢复出目标相位谱, 恢复相位谱经过傅里叶逆变换后清晰地显示了目标的轮廓和结构, 再结合 Labeyrie-Kroff 法得到了目标的高分辨率图像; 最后对实际天文图像进行处理, 使恢复后图像的分辨率相对于原始图像得到明显提高, 并且改进算法以更少的计算时间获得了与双谱截切法几乎同样的恢复效果.

关键词: 大气光学; 图像处理; 图像复原; 散斑成像; 相位恢复; 双谱计算; 高分辨率

中图分类号: O438

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)02-0210002-6

High Resolution Imaging of Extended Object by Speckle Imaging

REN Chen-gang^a, LIANG Yong-hui^a, YU Qi-feng^b

(a. College of Optoelectrics Science and Engineering; b. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to overcome the effect of the atmosphere turbulence and reconstruct the high resolution image of the extended object, an improved speckle imaging algorithm based on bispectrum truncation method was proposed. There are two problems in phase recovery using the conventional algorithms: one is the enormous amount of the bispectrum data, and the other is the complicated computation. The improved algorithm combines phase recovery with the bispectrum computation by the Hermite symmetry of image and the look-up table technique. Only the bispectrum in neighbored domain of a spatial frequency below the cut-off frequency are calculated and some constraint is added to the bispectrum coordinates, therefor the improved algorithm makes a dramatic reduction in the bispectrum data. The coordinate look-up table, which is applicable to the two neighbored quadrants in Fourier domain, describes the computation sequence of the bispectrum and the phase recovery. The look-up table makes the phase recovery become simple, for the bispectrum and the object phase can be obtained just in order of the look-up table. The results on simulated demonstrate that the improved algorithm is able to recover the object phase correctly with a 24% reduction in the bispectrum data. The phase spectrum obtained by the improved algorithm displays the profile and structure of the object after inverse Fourier transform. The results on real world astronomical data demonstrate the improved algorithm can restore the image with higher resolution than the original image and it obtain almost the same final image as bispectrum truncation method with less computation time.

Key words: Atmospheric optics; Image processing; Image restoration; Speckle imaging; Phase recovery;

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (No. 2011AA20118080333) 资助

第一作者: 任晨纲 (1984-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为自适应光学图像后处理. Email: ren_chengang@163.com

导师 (通讯作者): 于起峰 (1958-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为基于光测图像的精密测量. Email: yuqifeng@vip.sina.com

收稿日期: 2013-05-31; 录用日期: 2013-09-02

<http://www.photon.ac.cn>

Bispectrum computation; High resolution
OCIS Codes: 100.1160; 010.1290; 110.6150

0 引言

空间高分辨率光学成像技术在光学遥感、军事侦查、天文观测以及深空探测等领域具有广泛而迫切的需求。目标的高分辨率成像是军事目标发现与识别,以及人类认识太空、研究宇宙的最主要手段^[1-2]。但是空间目标的光波波前经过大气湍流传输后会发生畸变,这不仅限制了地基光学望远镜的分辨力,也降低了观测图像质量,主要表现为目标图像模糊和目标位置随机漂移等^[3]。1970年,Labeyrie发现相比于长曝光图像,短曝光图像中的散斑包含了目标更多的高频信息,并由此提出了散斑干涉技术^[4]。该技术通过一系列短曝光图像的平均功率谱和参考星的平均功率谱获得目标衍射极限幅度信息。散斑干涉技术只能给出目标的幅度谱,而不能得到目标的相位谱,为实现二维图像重建,交叉谱和双谱分别在不久之后相继被提出用于计算目标的相位谱。目标相位谱和散斑干涉术获得的幅度谱结合就能恢复出目标高分辨率图像,这种图像重建技术被命名为散斑成像技术^[5]。

散斑成像技术经过近40年的发展已经取得了许多研究成果。1992年,美国空军毛伊岛光学观测站成功地将散斑成像技术用于空间目标图像复原,通过处理1.6 m望远镜对哈勃太空望远镜的观测图像,使得原来模糊图像能清晰地显示哈勃的轮廓,图像的分辨率得到很大提高^[6]。1997年,Charles Matson等利用该技术对2.3 m望远镜的深空卫星观测图像进行重建后评估卫星的运行状态^[7]。1996年,G. Weigelt等利用散斑成像技术使得俄罗斯SAO(Special Astrophysical Observatory)6 m望远镜对恒星的观测结果分辨率达到了0.03",接近工作波长为700 nm的衍射极限分辨率^[8]。2004年,Carsten Denker等将散斑成像技术与自适应光学系统相结合对太阳进行观测,获得了76 cm望远镜的衍射极限图像^[9]。2010年,Cao和Woger等利用1.6 m望远镜对太阳不活跃区域进行观测,在观测时利用相关跟踪系统校正了望远镜震动和目标跟踪系统高频误差引起的图像运动,然后利用散斑成像技术进行图像处理,结果达到望远镜衍射极限分辨率^[10]。目前国外散斑成像技术不仅用于天文观测和空间目标监视,还广泛用于地面目标观测和识别以及水下目标图像重建^[11-12]。

中国科学院光电技术研究所和云南天文台对双星、三星和模拟图像复原结果进行了公开报道^[13-14],本文尝试将散斑成像技术用于对实际扩展目标的图像复原,并减小计算数据量以提高算法的运算速度。

1 基本原理

目标的短曝光图像蕴含了目标的近衍射极限信息,而图像傅里叶变换的高阶统计量能保留这些信息,因此从这些高阶统计量分别计算目标的幅度谱和相位谱,再通过傅里叶反变换就能重建目标高分辨率图像^[5,7]。散斑成像技术的关键是计算目标的幅度谱和相位谱,幅度谱反映了目标的辐射能量分布,相位谱反映了目标的轮廓和结构信息。

1.1 目标幅度恢复

图像傅里叶频谱 $I(f)$ 的模平方是图像功率谱,对所有短曝光图像的功率谱叠加后平均得到图像平均功率谱和目标功率谱 $|O(f)|^2$ 之间的关系为

$$\langle |I(f)|^2 \rangle = \bar{K}^2 \langle |H(f)|^2 \rangle |O(f)|^2 + P\sigma_n^2 + \bar{K} \quad (1)$$

式(1)中, $\langle \cdot \rangle$ 表示求均值, $H(f)$ 为成像系统的光学传递函数, $\langle |H(f)|^2 \rangle$ 常被称为散斑传递函数, \bar{K} 是每幅图像的平均光子数, σ_n^2 表示相机的加性噪声方差, P 为图像的像素数目。式(1)右边的后两项分别表示了光子噪声和相机加性噪声给图像功率谱带来的偏差,去除这两项后得到图像功率谱的无偏估计量 $\langle |I'(f)|^2 \rangle$,由此可以得到目标的幅度谱为

$$|O(f)| = \sqrt{\frac{\langle |I'(f)|^2 \rangle}{\bar{K}^2 \langle |H(f)|^2 \rangle}} \quad (2)$$

1.2 目标相位恢复

相位谱的估计方法主要有两种:交叉谱法和双谱法,但这两种方法都不能直接给出目标相位,而是给出目标相位的一个线性组合,因此还需要其它操作从交叉谱或双谱中重建目标的相位。由于双谱对目标在图像上的随机漂移不敏感,因此本文利用图像平均双谱恢复目标相位。在有噪声情况下,图像平均双谱的定义为

$$\langle B(f_1, f_2) \rangle = O(f_1)O(f_2)O^*(f_1 + f_2) \langle H(f_1) \cdot H(f_2)H^*(f_1 + f_2) \rangle - 2\bar{K} - 3P\sigma_n^2 \quad (3)$$

式(2)右边的 $\langle H(f_1)H(f_2)H^*(f_1 + f_2) \rangle$ 为实数,故当去除噪声的影响后,平均双谱的相位 $\phi_B(f_1, f_2)$ 与目标相位 $\phi_0(f)$ 构成相位闭合(Phase Closure),其关系式为

$$\phi_0(f_1 + f_2) = \phi_0(f_1) + \phi_0(f_2) - \phi_B(f_1, f_2) \quad (4)$$

如果得到 $\phi_B(f_1, f_2)$,则可以由目标在 f_1 和 f_2 处的相位得到 $f_1 + f_2$ 处的相位。在实际中为避免相位解缠和减小噪声的影响常采用式(5)计算相位。

$$\exp\{j\phi_0(f_1 + f_2)\} = \text{norml} \left(\sum_{f_1, f_2} w(f_1, f_2) \cdot \exp\{j\phi_0(f_1)\} \exp\{j\phi_0(f_2)\} \exp\{-j\phi_B(f_1, f_2)\} \right) \quad (5)$$

norml(\cdot)定义为归一化, $f_1 + f_2$ 处的目标相位由多个 (f_1, f_2) 的组合加权求和得到, $\omega(f_1, f_2)$ 为权值取决于双谱的信噪比. 目前由双谱相位得到目标相位的方法主要有递归法和最小二乘法, 本文利用递归法从低频到高频依次复原目标相位, 常用相位的计算起始点有零频点(该点的相位恒为 0)和距离其最近的 4 个点, 这 4 个点的相位值设为 0, 这种假设不会给相位恢复引入太大的误差只会让目标产生一个线性移位.

1.3 双谱计算方法

目标相位恢复的关键在于获得图像平均双谱的相位, 图像的双谱是四维数据并且数据量通常很大, 以大小为 256×256 的图像为例, 如果按照双谱定义直接计算, 且用 8 位 (bit) 数据格式保存结果则需要 32 768 Mbyte(兆字节)的存储空间. 因此必须考虑在不影响相位恢复的前提下如何尽可能地减小双谱数据量, 目前常用的双谱计算方法主要有三种: 基于 Radon 变换法、双谱截切法 (bispectrum truncation) 和子平面法, 其中双谱截切法相对于另外两种方法丢失的信息少且相位恢复结果最好^[15], 该方法根据双谱对称性只计算四维双谱的某一对称区间, 使得数据量为按照双谱定义直接计算的 1/12, 再对空间频率的取值进行限制来进一步减小数据量, 最后建立查找表来保存双谱数据.

本文对截切法进行改进, 不直接根据对称性来减小双谱数据量而从相位恢复角度来确定双谱的计算范围, 从而保证计算的双谱都将参与后续的相位恢复, 由此来减小双谱的冗余数据. 图像傅里叶频谱具有厄米特对称性, 即图像相位谱关于原点成负对称的, 因此只需恢复相邻两个象限的相位就能得到完整的相位谱 (本文选取第 1、4 象限, 见图 1).

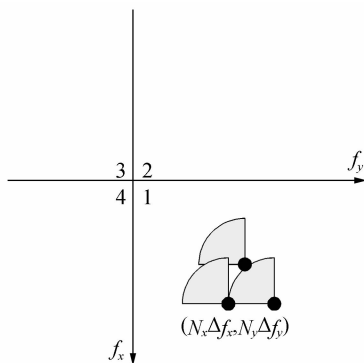


图 1 双谱计算示意图

Fig. 1 The diagram of bispectrum computation

选定的两个象限相位可以分别独立计算, 恢复某象限内的相位首先确定该象限内的双谱坐标, 双谱坐标 (f_1, f_2) 由该象限内空间频率的取值确定, f_1 在空间频域内取值直至望远镜衍射极限截止频率 f_D , f_2 则为微小偏移矢量, 并且 $|f_2| < r_0 / \lambda d$, r_0 为大气相干长度, λ 为工作波长, d 为成像系统的焦距, 这样就得到了整个象限的双谱坐标, 由此也就确定了该象限内的双谱

计算范围.

为了在第 1 象限内利用双谱坐标 (f_1, f_2) 恢复空间频率 $f_1 + f_2$ 处的相位, 假设 $f_1 + f_2 = (N_x \Delta f_x, N_y \Delta f_y)$, Δf_x 和 Δf_y 为离散化的空间频率间隔, N_x 和 N_y 分别表示空间频率在二维平面的离散化坐标, 其值为整数. f_2 确定了以 $(N_x \Delta f_x, N_y \Delta f_y)$ 为圆心的一个扇形区域 (见图 1). 坐标原点 (零频) 与该扇形区域内的点确定的矢量就是 f_1 , 而 f_1 与点 $(N_x \Delta f_x, N_y \Delta f_y)$ 之间的矢量就是 f_2 , 这样扇形区域内每个点就确立了一个双谱坐标 (f_1, f_2) , 每个双谱坐标表示了计算 $f_1 + f_2$ 处相位值的一条路径, 多条路径能得到 $f_1 + f_2$ 的多个相位值, 将其平均后作为 $f_1 + f_2$ 处的真实相位, 同时也减小了噪音引起的误差.

建立的查找表含有较多的冗余数据, 因此有必要添加限制条件来对查找表进行精简, 本文采用的限制条件见式 (6).

$$|f_1 + f_2| \leq |f_D|, |f_1| \geq |f_2|, |f_1| > 0, |f_2| > 0 \quad (6)$$

式中, $|f_1 + f_2| \leq |f_D|$ 表示空间频率取值不能超过望远镜截止频率, $|f_1| \geq |f_2|$ 则由于双谱满足对称性 $B(f_1, f_2) = B(f_2, f_1)$, 因此恢复相位若需要 $B(f_2, f_1)$ 可以直接调用 $B(f_1, f_2)$ 的计算结果.

对查找表根据 $f_1 + f_2$ 两个方向分量的大小进行排序, 如果先 f_x 方向后 f_y 方向, 则恢复相位时的计算顺序就是行扫描; 如果先 f_y 方向后 f_x 方向, 则恢复相位时的计算顺序就是列扫描. 这样坐标查找表不仅确定了双谱的计算范围, 同时也确定了相位的恢复顺序. 考虑到空间频率在第 1、4 象限内的取值是轴对称的, 因此第 1 象限的双谱坐标查找表也适用于第 4 象限, 在恢复相位时可以先根据相位恢复半径以及 f_1, f_2 的取值确定坐标查找表.

2 数值模拟实验

在分别得到目标幅度谱和相位谱后, 将两者相乘再进行傅里叶逆变换就能实现图像高分辨率重建, 整个算法的计算流程见图 2.

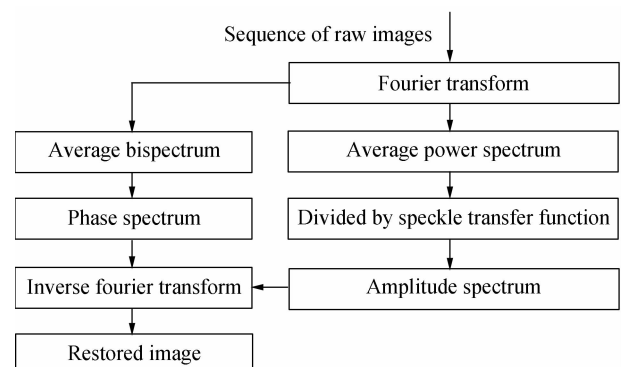


图 2 散斑成像技术处理流程

Fig. 2 Processing steps for speckle imaging technology

图 2 中的散斑干涉传递函数当有导星时由导星数据计算得到,当无导星时利用 Labeyrie-Kroff 法和大气相干长度 r_0 计算,但 r_0 的值通常是未知的,因此常用的方法是给定 r_0 一个取值范围,然后按照固定步长取值得到一组目标恢复图,最后从其中选择出最清晰的图作为最终结果。

为验证改进算法在双谱数据量减小同时能否有效恢复出目标相位进行了数值模拟实验.采用 Kolmogorov 功率谱反演法生成随机相位屏来模拟空间目标经过大气湍流成像,假设 D/r_0 为 12, r_0 的值为 0.1 m, D 为望远镜口径大小,空间目标原始图为图 3(a),该图是航天

飞机对哈勃望远镜的实拍图^[16],其大小为 850×850 ,对其模拟生成 100 帧短曝光模糊图像,按照图 2 所示的计算流程对这 100 帧图像进行处理,最后的实验结果见图 3。

图 3(b)是利用 Fisher 函数^[13]从 100 帧模拟图像中选取的成像质量最好帧,相对于原始图像其细节信息丢失严重;由于相位谱是个复数矩阵因而难以直接判断恢复前后之间的差异,故对相位谱进行傅里叶逆变换后再取实数部分得到图像,图 3(c)是由本文算法恢复的相位谱得到的图像,其清晰地给出哈勃望远镜的轮廓和几何结构信息;图 3(d)和图 3(e)分别是在相

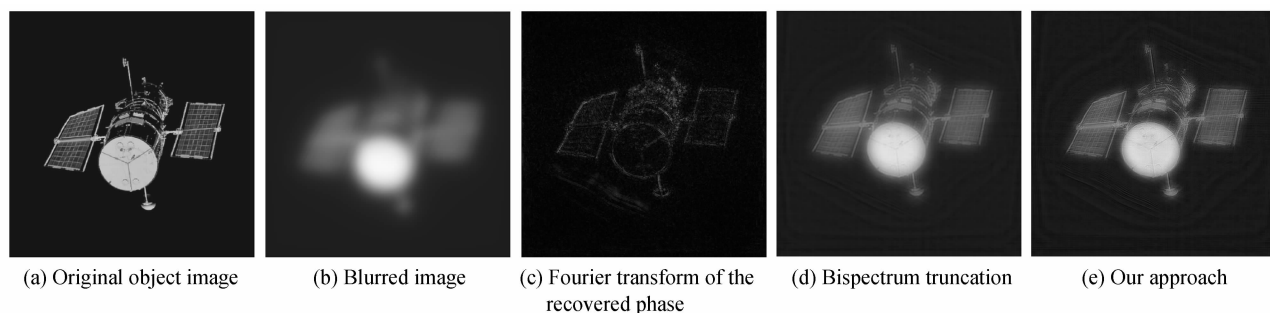


图 3 模拟图像复原

Fig. 3 Image restoration on simulated data

位恢复中利用双谱截切法和本文方法的图像复原结果,两者分辨率相对于图 3(b)明显提高,许多模糊细节变清晰,但难以直接看出两种方法恢复结果的差异。

将本文的双谱计算方法与双谱截切法进行比较,为评价图像恢复质量,分别计算图 3(d)和图 3(e)与原始图像的归一化均方误差(Normalized Mean Square Error, NMSE): $NMSE = \|I - I_0\|_2^2 / \|I_0\|_2^2$,其中 I_0 表示归一化的原始图像, I 表示归一化的复原图像.计算结果分别为 0.435 3 和 0.445 7,表明截切法图像复原质量要略优于本文算法.这主要是因为两种方法均采用递归法从双谱复原目标相位,而截切法则利用了更多的双谱数据。

表 1 为两者算法针对不同大小图像($N \times N$)得到的平均双谱的数据量(单位为兆字节, Mbyte),表 1 中的 M 为 $|f_2|$ 离散化的最大取值,在计算时截止频率模值 $|f_D| = N/2$,表 1 中的第 4 行和第 7 行分别给出本文算法与截切法的平均双谱数据比例,双谱元素的实数

表 1 不同算法的平均双谱数据量(兆字节)

Table 1 Size of average bispectrum for different algorithms (Mbyte)

Image size	64×64	128×128	256×256
Our approach($M=5$)	0.36	1.58	6.56
Truncation($M=5$)	0.5	2.1	8.8
Ratio (%)	72	76	75
Our approach($M=10$)	0.88	4.76	21.36
Truncation($M=10$)	1.5	6.7	28.6
Ratio (%)	59	71	75

和虚数部分均用 8 字节存储,结果表明本文算的双谱数据量相对于传统算法至少减小了 24%。图 3(c)和图像复原结果表明本文算法在双谱数据量减小的同时仍能较准确恢复出目标相位,其图像复原质量与截切法基本一样。

3 天文图像复原实验

3.1 双星

将改进算法对网上搜集到的双星图像(见图 4)进行了处理,该双星图像是由 Capella 天文台 24 英寸望远镜对天琴座 ϵ 星双星系统的观测结果,双星间距为 $2.3''$,相对星等为 1.08,成像设备为 DFK 31BU03CCD 相机,其像素间距为 $0.06''$ ^[17]。

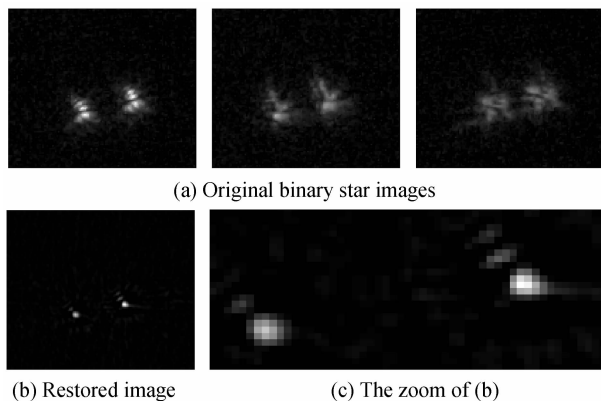


图 4 双星图像复原

Fig. 4 Image restoration on real binary star data

双星图像总共 39 帧, 且图像大小为 132×112 . 图 4(a) 为从原始双星图像中随机选取的 3 帧, 图 4(b) 为重建的双星图像, 图 4(c) 是对其进行放大后显示, 双星之间的像素数约为 36, 故双星间距为 $2.16''$, 这与双星的实际间距基本吻合, 因此本文算法实现了双星图像的高分辨复原.

3.2 月球

将改进算法对实际拍摄的月球图像(见图 5)进行

了处理, 实验望远镜为 Meade LX200R, 其口径为 25.4 cm, 焦距为 2 540 mm. 采用瑞士 PhotonFocus 公司的 MV2-D1280-640 CMOS 相机, 其满分辨率为 $1\ 280 \times 1\ 024$. 拍摄时相机曝光时间为 19 ms, 帧频为每秒 20 帧, 数据总共有 2 000 帧, 每帧图像的尺寸为 512×512 . 由于望远镜的跟踪误差导致月球在图像中有明显的移动, 故选取前 200 帧图像进行处理.

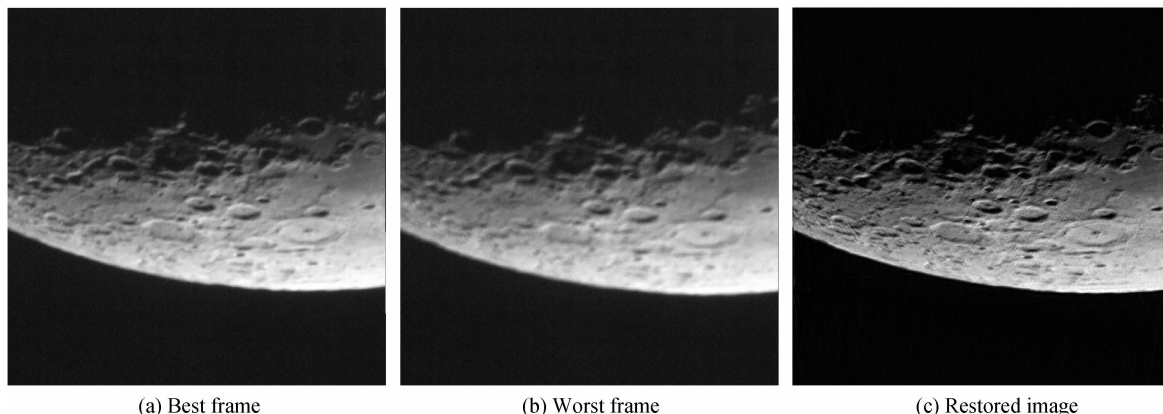


图 5 月球表面图像复原

Fig. 5 Image restoration of the moon surface

图 5(a) 与图 5(b) 分别为 200 帧原始图像中利用 Fisher 函数选取的最好帧和最差帧, 图 5(c) 是本文算法的图像复原效果, 可以明显看出复原图像显示了更多的细节信息, 图像清晰度和分辨率得到明显提高. 由于截切法的复原图像与图 5(c) 基本一致, 因此本文不再给出. 本文散斑成像算法的执行软件为 MATLAB, 实验计算机的 CPU 为 Intel(R) Core(TM) i7 处理器, 主频为 3.4 GHz, 计算机内存为 16 Gbyte, 在计算中数据采用 64 位双准确度浮点数, 每个双谱元素因有实部和虚部故占用 16 个字节存储空间, 截切法的计算耗时为 207.4 s, 而本文算法的计算时长为 151.6 s.

4 结论

本文介绍了散斑成像技术通过分别恢复目标的幅度和相位来实现图像的高分辨复原的原理和算法处理流程. 研究了利用双谱恢复目标相位的算法, 对常用的双谱截切法进行了改进, 模拟实验表明本文算法的双谱数据量相对于原来算法至少减少了 24%, 但图像复原质量与双谱截切法基本一样. 最后将图像重建算法对模拟图像和实际天文图像进行了处理, 复原的图像质量明显提高, 其显示了更多细节信息, 实验结果表明本文算法能有效克服大气湍流影响实现图像高分辨率复原.

参考文献

[1] YAO Bao-li, LEI Ming, XUE Bin, *et al.* Progress and application of high-resolution and super-resolution optical imaging in space and biology [J]. *Acta Photonica Sinica*,

2011, **40**(11): 1607-1618.
 姚保利, 雷铭, 薛彬, 等. 高分辨和超分辨光学成像技术在空间和生物中的应用[J]. *光子学报*, 2011, **40**(11): 1607-1618.
 [2] BAI Jun-qi, ZHENG Jian, ZHAO Chun-guang, *et al.* Super-resolution reconstruction of infrared image based on self-adaptive gradient threshold [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 554-557.
 白俊奇, 郑坚, 赵春光, 等. 基于梯度阈值自适应处理的红外图像超分辨率重建[J]. *光子学报*, 2012, **41**(5): 554-557.
 [3] YANG Lian-chen, SHEN Mang-zuo, GUO Yong-hong. The speckle imaging simulation of space objects [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(12): 1108-1112.
 杨连臣, 沈忙作, 郭永洪. 天体目标斑点成象的模拟[J]. *光子学报*, 2000, **29**(12): 1108-1112.
 [4] LABEYRIE A. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by Fourier analyzing speckle patterns in star images [J]. *Astron & Astrophys*, 1970, **6**: 85-87.
 [5] ROGGMANN M C, WELSH B. Imaging through turbulence [M]. Boca Raton: CRC Press, 1996, 123-168.
 [6] LAWRENCE T W, GOODMAN D M, JOHANSSON E M, *et al.* Speckle imaging of satellites at the U. S. air force maui optical station [J]. *Applied Optics*, 1992, **31**(29): 6307-6321.
 [7] MATSON C L, FOX M, HEGE E K, *et al.* Deep-space satellite-image reconstructions from field data by use of speckle imaging techniques: images and functional assessment [J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(14): 3120-3126.
 [8] WEIGELT G, BALEGA Y, HOFMANN K H, *et al.* First diffraction-limited speckle masking observation of the Mira variable R Cas with the 6 m SAO telescope [J]. *Astron & Astrophys*, 1996, **316**: 21-24.
 [9] DENKER C, MASCARINAS D, XU Y, *et al.* High-spatial resolution imaging combining high-order adaptive optics, frame selection, and speckle masking reconstruction [R]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004.

- [10] CAO B W, GORCEIX B N, COULTER B R, *et al.* Nasmyth focus instrumentation of the new solar telescope at big bear solar observatory[C]. SPIE, 2010, **7735**: 77355 V1-6.
- [11] PARKER A. The sharper image for surveillance[J]. *Science & Technology Review*, 2005, **6**: 20-22.
- [12] KANAEV A V, HOU W, WOODS S, *et al.* Restoration of turbulence degraded underwater images [J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**: 0570071-9.
- [13] LIU Zhong, QIU Yao-hui, LOU Ke, *et al.* New progress in the high resolution speckle imaging at Yunnan observation [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 1998, **39**(2): 217-224.
刘忠, 邱耀辉, 楼可, 等. 云南天文台高分辨率斑点成像的新进展[J]. *天文学报*, 1998, **39**(2): 217-224.
- [14] LUO Lin, LIAO Sheng, FAN Min, *et al.* Effects of large telescope aberration on speckle imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1447-1451.
罗林, 廖胜, 樊敏. 天文望远镜像差对斑点成像技术的影响 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(11): 1447-1451.
- [15] PEHLEMANN E, VON DER LUHE O. Technical aspects of the speckle masking phase reconstruction algorithm [J]. *Astron & Astrophys*, 1989, **216**: 337-346.
- [16] GREEN J J, HUNT B R. Improved restoration of space object imagery [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, **16**(12): 2859-2865.
- [17] HIRSCH M, HAMPLING S, SRA S. Online multi-frame blind deconvolution with super-resolution and saturation correction [J]. *Astron & Astrophys*, 2011, **531**(A1): 1-11.