

doi:10.3788/gzxb20174606.0610001

高阶光学强度相干成像的相位恢复方法改进

高昕¹, 冯灵洁², 陆长明¹, 李希宇¹, 唐嘉¹

(1 北京跟踪与通信技术研究所 空间目标测量重点实验室, 北京 100094)

(2 北京空间信息中继传输技术研究中心, 北京 100094)

摘 要: 为了提高强度相干方法对空间目标的成像质量, 避免复杂的相位估计过程及其引入的额外误差, 对高阶强度相干的相位恢复方法进行了改进. 在对高阶强度相干相位测量信噪比定量讨论的基础上, 选择三阶强度相干方法对远场目标测量过程进行仿真, 针对相位解算过程中频谱模值传递噪声放大等问题, 根据相位估计与相位测量结合的思路, 提出了相位闭合正则项改进算法. 通过室内强度相干成像实验, 比较改进算法与最速下降法、先验信息迭代方法对相同测量结果的图像恢复效果. 实验结果表明, 改进算法得到的图像误差值低于原有方法, 较为有效地提高了成像质量.

关键词: 空间监视; 图像重构; 傅里叶光学; 相位测量; 信噪比

中图分类号: O428.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)06-0610001-9

Improved Phase Retrieval Method of High-order Optical Intensity Correlation Imaging

GAO Xin¹, FENG Ling-jie², LU Chang-ming¹, LI Xi-yu¹, TANG Jia¹

(1 Key Laboratory of Space Object Measurement, Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

(2 Beijing Space Information Relay and Transmission Technology Research Center, Beijing 100094, China)

Abstract: To improve the imaging quality of intensity correlation method and avoid the complicated estimation and extra error, the phase retrieval procedure of high-order intensity correlation was ameliorated. Based on the quantitative discussion of the signal to noise ratio of high-order intensity correlation phase measurement, the third-order intensity correlation imaging was selected to simulate the far-field object measurement, according to which the magnifying of spectral modulus error is analyzed. To solve the problem that the spectral modulus would be magnified in the process of phase calculation, the phase closure regularization algorithm of improved phase retrieval was proposed combining phase estimation and phase measurement. Further, the effectiveness of the improved method was verified in the designed indoor experiment by comparison with previous methods of the steepest decent method and prior information iteration method. The results show that image error caused by the proposed method is lower than that of the previous methods, which improve the quality effectively.

Key words: Space surveillance; Image reconstruction; Fourier optics; Phase measurement; Signal to noise ratio

OCIS Codes: 100.5070; 070.0070; 110.3175

0 引言

空间目标监视与识别^[1]是空间防御的重要组成部分,亦是维护国家空间与国防安全的重要手段.对空间目标成像是实现空间目标识别的最直接方法.然而,对于万公里量级以上的中高轨卫星、空间碎片等远距离

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No. 2011AA8080110)资助

第一作者: 高昕(1973—),男,研究员,博士,主要研究方向为飞行器光学测量及成像技术. Email: gaoxin526@sina.com

收稿日期: 2016-10-20; 录用日期: 2017-02-28

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

空间目标而言,成像系统的分辨力需达到毫角秒量级才能获得其清晰图像.受望远镜口径的限制^[2],传统波前成像方法的分辨力难以达到要求.

强度相干方法(Intensity Correlation Imaging, ICI)在空间目标成像方面具有独特的优势,它利用高频探测器阵列获得目标在观测面的光强随机涨落,通过计算不同位置光强涨落的相关度获得目标频谱模值,结合相位信息即可获得目标图像.作为一种非传统的干涉成像方法,强度相干方法的成像分辨力与观测基线成正比^[3],能够较为简单地通过延长基线提高成像分辨力,且该方法无需获得光场干涉条纹,对大气湍流不敏感,在空间目标高分辨力成像领域具有独特优势和良好发展前景.

然而,由于强度相干方法在成像过程中仅能获得目标频谱模值,难以获得目标频谱相位,目前主要应用于恒星角直径测量领域.现有的相位获取方法主要有相位估计与相位测量两种,而受测量信息量限制,利用相位估计方法恢复的目标图像会存在镜像旋转,同时在测量信噪比较低情况下,恢复图像中存在较大卷积畸变噪声^[4](第二类恢复噪声),严重影响成像质量.高阶强度相干方法可直接测量目标的频谱相位信息^[5],从根本上避免了歧义图像的产生,对提高目标图像恢复质量具有重要意义.但由于高阶强度相干方法对测量噪声较为敏感^[6],在现有探测精度下,难以直接获得较高质量的目标图像.

本文考虑将相位估计与相位测量方法结合,充分利用相位测量信息和目标边界信息,提出了相位闭合正则项(Phase Closure Regularization, PCR)改进算法,以提高相位恢复信噪比,实现对目标图像恢复质量的改善,并通过室内实验对该方法的有效性进行验证.

1 高阶相干相位测量原理

高阶强度相干测量原理,顾名思义,是相较于二阶强度相干而言的.二阶强度相干方法根据 HBT 效应^[7],通过对探测器测得的目标光强涨落值两两之间的相关运算,获得目标的空间相干度,再由 Van Cittert-Zernike 定理获得目标的频谱模值分布^[8].在此基础上,通过 Gerchberg-Saxton 算法^[9]、误差下降法(Error Reduction, ER)或混合输入输出(Hybrid Input-Output, HIO)等相位估计算法^[10]获得相位信息重构目标图像

传统强度相干成像设备如图 1.由于成像过程中真实频谱相位的缺失,有较大概率引入歧义图像和过拟合噪声^[11]等,严重影响重构图像质量.

高阶强度相干方法通过测量多个位置光强涨落相关度,可获得目标的空间频谱模值与相位,据此可直接获取目标的真实图像.三阶强度相干测量探测器排布^[12]与高阶强度相干测量的矩阵式探测器阵列^[13-14]示意图分别如图 2(a)、(b).

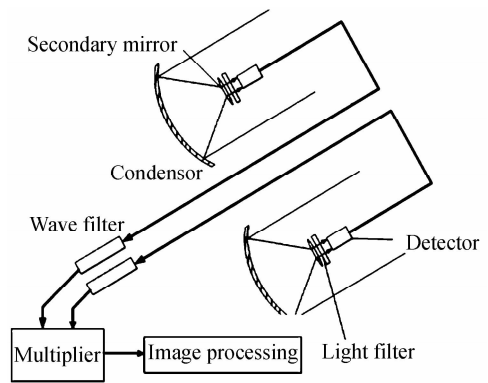


图 1 二阶强度相干原理
Fig. 1 Second order intensity correlation diagram

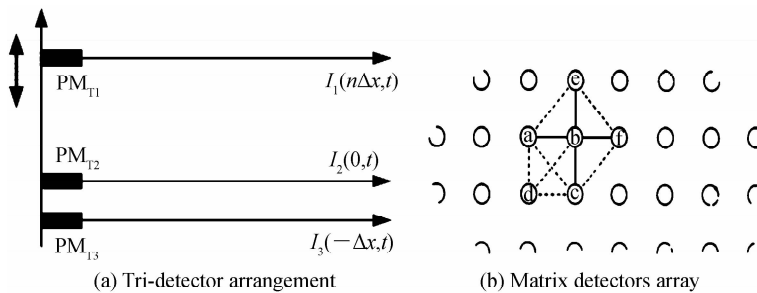


图 2 高阶强度相干测量探测器排布
Fig. 2 Detector arrangement of high-order intensity correlation measurement

以三阶强度相干一维测量为例,如图 2(a),间距为 Δx 的两探测器 PD_2 、 PD_3 位置固定放置, PD_1 沿 x 轴方向移动,移动距离为 Δx 的整数倍.对三探测器接收光强涨落进行三阶相关运算,得到的三阶相干中心

项^[15] G_{123} 实部为

$$\text{Re}G_{123} = |\gamma[(n+1)\Delta x]| |\gamma(n\Delta x)| |\gamma(\Delta x)| \cos\{\varphi[(n+1)\Delta x] - \varphi(n\Delta x) - \varphi(\Delta x)\} \quad (1)$$

式中, $|\gamma[(n+1)\Delta x]|$ 、 $|\gamma(n\Delta x)|$ 、 $|\gamma(\Delta x)|$ 分别是对应位置的目标频谱模值, $\varphi(n\Delta x)$ 为对应的目标频谱相位.

定义三相位之差为三阶相干中心项的相位, 即

$$P(n\Delta x) = \varphi[(n+1)\Delta x] - \varphi(n\Delta x) - \varphi(\Delta x) \quad (2)$$

$P(n\Delta x)$ 即为三点间的闭合相位(Phase closure). 根据闭合相位通过递推、分解等方法可解算获得目标单个相位. 四阶及高阶强度相干测量同样可获得高阶相干中心项, 由此可建立多元一次方程组^[14], 求解得到目标相位谱.

2 相位闭合正则项改进算法

与原有相位恢复方法相比, 高阶强度相干方法可测得的目标真实频谱相位, 避免了复杂的相位估计过程及其引入的额外误差, 具有独特优势. 但由于高阶相干的计算对测量数据的噪声更为敏感, 在现有探测精度下将测得相位信息直接用于重构目标图像尚不理想. 针对这一问题, 对高阶相干相位测量信噪比与相干阶数的关系进行了建模定量讨论, 在此基础上, 对远场目标的三阶相干测量进行了仿真实验, 针对相位解算过程中频谱模值传递噪声放大等问题, 提出了改进算法.

2.1 三阶相干在空间目标成像中的优势

对远距离空间目标进行强度相干测量时, 高频探测器上接收获得的光强涨落极低, 探测器在单个采样周期内接收的光子数极少, 在探测过程中光更多地表现出其粒子性, 利用现有单光子探测器可直接获得探测器上各个反射光子的到达时间. 为更准确考量空间目标强度相干测量的信噪比, 根据光电探测的半经典模型对探测器上接收光子的分布规律进行分析^[16], 建立符合计数方法下的高阶强度相干模型.

符合计数方法用于测量同时发生或短时间内发生的关联事件, 是量子光学中的重要测量方法^[17]. 符合事件定义为在符合时间内探测器上均有光子到达, 符合时间设置为探测器的时间分辨力 Δt . 在远场 x_1, x_2, \dots, x_N 的 N 个空间位置分别放置探测器 D_1, D_2, \dots, D_N , 通过符合计数器对热光源经远场传播到达探测器的光子进行符合计数, 实现对热光源照明的目标的强度相干测量. 以探测器的时间分辨力 Δt 为单次探测时间, 定义单次探测内的相干胞元数为 $\Delta t/\Delta\tau$, 实际探测时的积分探测时间为 T , 三者的关系如图 3.

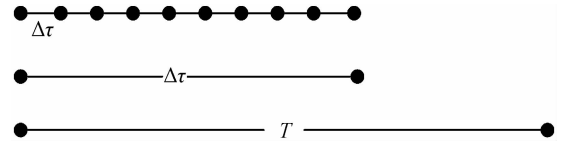


图 3 光场相干时间、探测器时间分辨力与积分测量时间示意图
Fig. 3 Schematic diagram of coherence time, detector time-resolution and integration detection time

将探测器在单位时间内接收到的光子数 r 定义为探测器光子计数率, 单次探测时间 $\Delta t \gg \Delta\tau$. 随着科技水平与制造工艺的发展, 批量生产的探测器量子效率等性能差异被可控制在较小的范围. 在目前实验精度条件下, 认为这一差异对测量结果的影响在可接受的范围内. 在此基础上, 建立基于符合计数法的 N 阶 HBT 效应的模型, 对包含目标相位信息的高阶相干中心项的信噪比进行分析. 远场探测面光场的 N 阶相关函数^[18] 为

$$G^{(N)}(x_1, \dots, x_N) = \sum_P \prod_{k=1}^N G(x_k, P x_k) \quad (3)$$

式中, $P x_k$ 为序列 $\{x_1, \dots, x_N\}$ 的第 k 个元素, 将所有不同种排列的组合相加, 则式(3)共有 $N!$ 项, 包含偶然符合事件数量和所有不大于 N 阶的 HBT 效应符合事件数量. N 阶 HBT 效应符合事件数量所对应的 N 阶强度相干中心项的信号为 $(r\Delta\tau)^N \frac{\Delta t}{\Delta\tau}$. 单次探测中, 偶然符合事件计数为 $(r\Delta t)^N$. 根据光电探测半经典原理, 这部分光子是相互独立的, 探测器在单位时间内接收的光子个数服从泊松分布. 偶然符合事件引起的计数带来测量噪声, 测得的偶然符合计数为泊松分布的估计均值, 取其标准差 $(r\Delta t)^{N/2}$ 为噪声. 积分探测时间 T 内, N 阶相干中心项的信噪比, 即 N 阶相干相位测量信噪比为

$$\text{SNR}(N, T) \sim g_{1\dots N} \times (r\Delta\tau)^{N/2} (\Delta\tau/\Delta t)^{N/2-1} \sqrt{T/\Delta t} \quad (4)$$

为实现对目标频谱相位信息的测量,需保证相干阶数大于 2. 将单位光场相干时间 $\Delta\tau$ 内,每个探测器接收的光子数 $r\Delta\tau$ 定义为单模光子数. 根据式(4)可知,高阶相干中心项的信噪比与单模光子数的 $N/2$ 次方成正比,与相干胞元数 $\Delta t/\Delta\tau$ 的 $N/2$ 次方成反比. 而现有探测器的时间分辨力 Δt 远长于光场相干时间 $\Delta\tau$,且对于空间目标而言,探测器感光面上接受获得的单模光子数约在 10^{-4} 量级. 因此随着探测阶数 N 的增加,高阶相干正则项的探测信噪比急剧下降.

根据以上讨论,对远距离空间目标而言,其光谱宽度较宽且到达探测器感光面上的亮度较低,其单模光子数远小于 1,在所有高阶强度相干测量中,三阶强度相干相位测量的信噪比最为理想. 以夜空中亮度最高的恒星 Sirius 为例^[19],假定探测器集光面积为 1m^2 ,单模光子数 $r\Delta\tau\sim 10^{-4}$,进行 $T=1\text{h}$ 的积分时间探测,得到三阶相干中心项的信噪比 $(r\Delta\tau)^{3/2}\sqrt{T\Delta\tau}/\Delta t$ 可达到 1 左右,因而认为对这样的亮星进行三阶相干测量是较为可行的. 在对亮度远低于恒星 Sirius 的远距离空间目标成像时,利用三阶强度相干方法测得的相位值信噪比远高于其他高阶相干测量方法. 因此,在现有观测条件下,选择三阶强度相干方法在远距离空间目标成像领域最有优势,其相位信噪比最为理想且实现难度最小.

2.2 三阶相干方法在空间目标成像中存在的问题

由于空间目标的亮度较低,探测器感光面上接收获得的单模光子数远小于 1,为提高频谱相位信息的测量信噪比,将选用三阶强度相干方法来获取目标频谱相位.

三阶强度相干的单个相位解算是通过闭合相位求得的,因而相位闭合项的噪声直接决定单个相位估计的准确性. 由式(1)可得,闭合相位余弦值的计算公式为

$$\cos\Delta\varphi = \frac{\text{Re}\mathbf{G}_{123}}{2|\gamma_{12}||\gamma_{23}||\gamma_{13}|} \quad (5)$$

由式(5)可知,相位闭合项计算涉及的测量量有三阶相干中心项和二阶相干中心项对应的频谱模值,故这两部分的噪声都将影响相位闭合的计算. 不同于傅里叶望远镜成像方法直接由解调得到的测量量经过简单运算得到相位闭合的过程,由强度相干成像方法获得相位闭合项需要获得频谱模值估计值. 对远距离目标成像时,由强度相干原理估计得到的目标频谱模值信噪比较低,经式(5)除法运算将会进一步放大噪声的影响,使获得的相位闭合项误差远大于傅里叶望远镜成像方法,由相位闭合项解算单个相位变得困难.

选用 64×64 像素卫星图片作为待成像的远场目标,如图 4(a). 为保证恢复获得的图像充分满足空间约束条件,将目标空间频谱 U-V 平面的采样频率设定为图像面空间采样频率的两倍,即采样后获取 128×128 空间频谱模值矩阵. 对目标的三阶强度相干成像过程进行仿真,得到远场强度涨落分布如图 4(b).

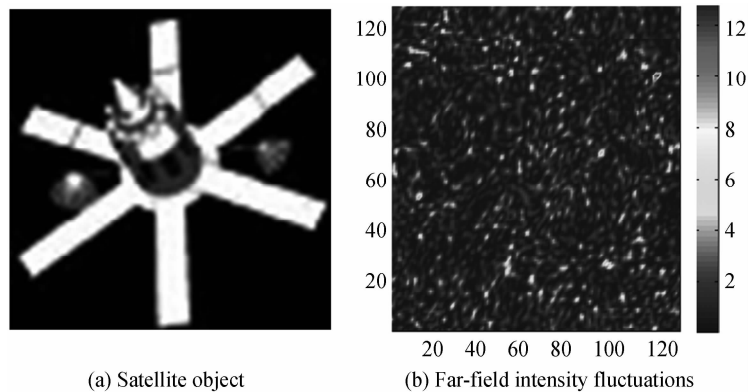


图 4 模拟目标光强涨落仿真

Fig. 4 Simulation of satellite object intensity fluctuations

计算接收平面上任意两点间光强涨落的相关度即可获得目标对应基线上的功率谱,进行 1200 次重复运算后获得的目标功率谱分布,如图 5(a). 估计功率谱误差在 10^{-3} 量级,且在整个频谱面误差近似均匀分布,低频与高频部分噪声大小相同,其测量信噪比取决于信号的大小,故在功率谱估计值较大的位置测量信噪比高. 由图 5(b)可看出,对模拟卫星这样的远场目标,其目标空间频谱的中频段和高频段测量结果大部分接近于零,导致此区域内频谱模值测量信噪比较低. 而式(5)中,信噪比低且测量结果接近于零的频谱模值处于分母项,将在闭合相位测量值中引入较大噪声,导致测量信噪比降低.

仿真探测器 PD_1 和 PD_2 固定于 $(0,0)$ 和 $(0,1)$ 位置,探测器 3 在观测面上移动时的三阶相干中心项实部 ReG_{123} 测量结果,即式(5)的分子项,如图 5(b). 根据仿真获得的目标频谱模值与三阶相干中心项,利用式(5)即可求解闭合相位的余弦值,其分布如图 6.

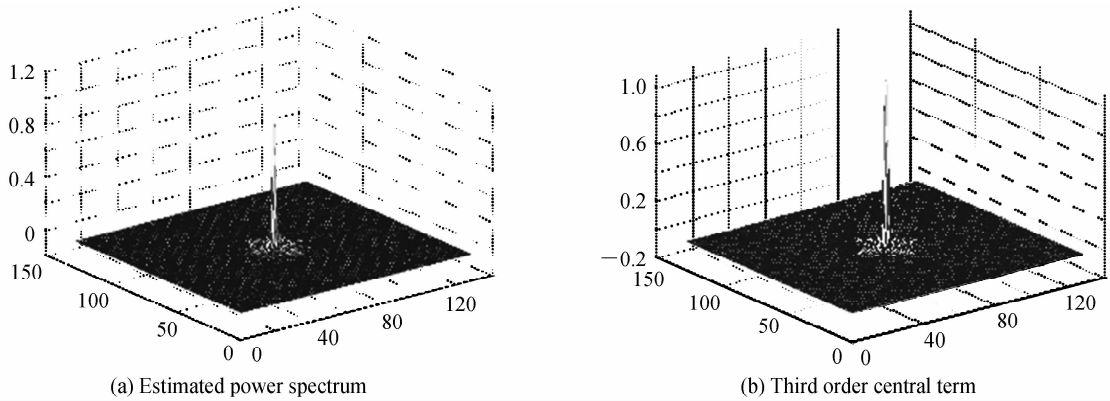


图 5 二阶与三阶强度相干测量值

Fig. 5 Results of second order and third order intensity correlation measurement

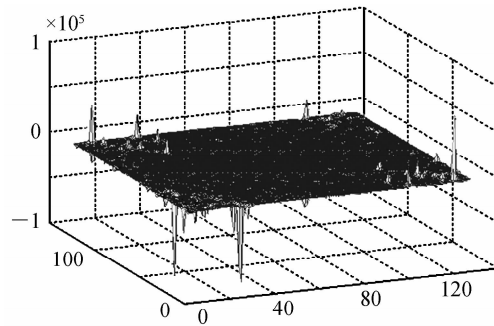


图 6 相位闭合项余弦值分布

Fig. 6 Cosine value of phase closure term

从仿真结果看,相位闭合项计算获得的噪声较大. 频谱面上多点的计算结果远远超出余弦值值域 $[-1, 1]$. 为分析相位闭合余弦值的噪声来源,抽取测得闭合相位余弦值的第 64 列和与其对应的分母项 $1/|\gamma_{12}| |\gamma_{23}| |\gamma_{13}|$, 仿真结果如图 7.

从图 7 可看出,相位闭合余弦值在中高频部分噪声较大,并且频谱模值处于分母位置,导致传递噪声急剧增大,使得相应位置的相位闭合余弦值远远超出值域范围 $[-1, 1]$. 利用此方法求解相位时,大部分数据点无法用于进一步单个相位解算.

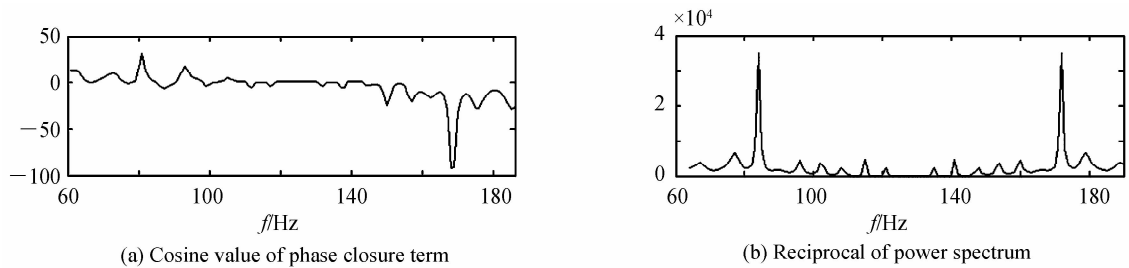


图 7 相位闭合项噪声与功率谱倒数对应分布

Fig. 7 Phase closure noise and corresponding power spectrum reciprocal distribution

由分析和仿真可知,尽管相位闭合方法在强度相干成像中理论可行,但由于在空间目标强度相干成像中二阶相干项引入的传递噪声较大,导致利用此方法难以实现相位解算. 在现有实验条件下,亟需对现有高阶相干相位计算方法进行模型改进,降低频谱模值噪声对测量相位的影响,提高空间目标相位测量信噪比,进而改善成像质量.

2.3 相位闭合项改进算法

根据对高阶强度相干模型的讨论,结合三阶相干模型在空间目标成像领域的优势对三阶相干相位计算方法进行改进.

现有 ER、HIO 等迭代傅里叶变换相位恢复算法均可等效成利用最优化方法在限制空间内求解频谱模值误差目标函数最小值的过程,故将相位闭合正则项加入到优化目标函数,即可实现真实相位信息对相位恢复过程的良好约束与改进,减少因歧义图像导致恢复结果与真实目标图像的偏离,提高成像质量.影响重构图像质量的两大因素为频谱模值估计与相位恢复的准确度,对优化函数的改进将从这两方面入手.

利用地基强度相干阵列对远距离目标成像时频谱模值测量噪声主要来源于探测器光电流散粒噪声,其信噪比与频谱模值平方成正比,据此在优化目标函数中加入权重函数,对频谱模值误差进行约束,即

$$J_m = \{W(u, v) [|G_k(u, v)| - |G_0(u, v)|]\}^2 \quad (6)$$

式中, $W(u, v)$ 为频谱模值噪声权重函数, $|G_0(u, v)|$ 为测量空间频谱模值, $|G_k(u, v)|$ 为第 k 步恢复图像 $x_k(m, n)$ 的空间频谱模值.

利用高阶相干测得的相位信息对图像恢复迭代过程加以约束,将相位测量与相位估计相结合,可有效降低现有恢复算法中由于真实相位信息缺失引起的第一类歧义图像和第二类歧义图像的出现概率.由式(5)知,在已经估算出频谱模值时,相位闭合项中所包含的相位信息只与三阶相干中心项的实部 $\text{Re}G_{123}$ 有关.因此可用 $\text{Re}G_{123}$ 代替相位闭合余弦值,求与理论值的残差作为相位闭合正则项,减少后续目标函数最优化过程的运算复杂度,同时避免由相位闭合余弦值求解过程中频谱模值测量误差作为分母项引入的传递噪声.定义相位闭合正则项为

$$J_{\text{phase}} = [\text{Re}G_{123} - G_{123m}]^2 \quad (7)$$

式中, $\text{Re}G_{123}$, G_{123m} 分别为三阶相干中心项的理论值与测量值.

综合式(6)、(7),提出相位闭合正则项(PCR)改进算法,修正后的目标函数可表示为

$$J = J_m + J_{\text{phase}} = \{W(u, v) [|G_k(u, v)| - |G_0(u, v)|]\}^2 + \eta [(\text{Re}G_{123})_k - \text{Re}G_{123m}]^2$$

$$\text{s. t. } x(m, n) \geq 0, \text{Im}[x(m, n)] = 0; \quad (8)$$

式中, η 为相位正则项系数, $\text{Re}G_{123m}$ 为测得三阶相干中心项实部, $(\text{Re}G_{123})_k$ 为第 k 步恢复图像 $x_k(m, n)$ 的三阶相干中心项实部.空间限制域为 $x(m, n) \geq 0, \text{Im}[x(m, n)] = 0$.

改进的最优化目标函数和空间约束超平面维度极高,且测量结果中含有较大噪声,使得目标函数在约束超平面上存在多个局部极小值.因而求解该目标函数在限制超平面上的最小值的计算量极大,且得到的最优化结果易陷于局部极小值中,导致相位恢复停滞.在此利用 HIO 算法所等效的误差补偿优化策略,探讨利用迭代方法求解目标函数的全局最小值,求解过程为:

1) 根据测得的空间频谱模值和相位闭合正则项设定误差函数,并用误差函数对待恢复图像矩阵中各元素求导,即

$$\frac{\partial J}{\partial x_k(m, n)} = 2 \cdot \text{Re}(y - y_1) + 2 [\{ \text{Re}G_{123} - \text{Re}G_{123m} \} \cdot \text{Re} [\frac{\partial G_{123}}{\partial x(m, n)}]] \quad (9)$$

式中

$$\begin{cases} y = \text{IFFT}[W^2(u, v)G_k(u, v)] \\ y_1 = \text{IFFT}[W^2(u, v) \frac{|G_0(u, v)|}{|G_k(u, v)|} G_k(u, v)] \\ \text{Re} \frac{\partial G_{123}}{\partial x(m, n)} = G_k(u_2, v_2) G_k^*(u_3, v_3) \cos \frac{2\pi}{N}(u_1 m + v_1 n) + G_k(u_1, v_1) G_k^*(u_3, v_3) \cdot \\ \cos \frac{2\pi}{N}(u_2 m + v_2 n) + G_k(u_1, v_1) G_k(u_2, v_2) \cos \frac{2\pi}{N}(u_3 m + v_3 n) \end{cases}$$

2) 将恢复图像 $x_k(m, n)$ 以优化步长 α 沿导数方向上移动至该方向上目标函数极小值处,获得新恢复图像 $x'_k(m, n)$, 即

$$x'_k(m, n) = x_k(m, n) - \alpha \frac{\partial J}{\partial x_k(m, n)} \quad (10)$$

3) 由最速下降方法获得的新恢复图像仅为目标函数在单一方向上的最小值,且此时求解所得的目标函

数极小值点不在空间限制超平面上,恢复的目标图像不再符合空间限制条件.根据空间域限制条件,对超出目标边界的目标估计图像,利用误差补偿方法对目标新图像进行修正,即

$$x_{k+1}(m,n) = \begin{cases} x'_k(m,n) & x'_k(m,n) \geq 0 \\ \kappa[x_k(m,n) - \frac{1}{\alpha}x'_k(m,n)] & \text{others} \end{cases} \quad (11)$$

式中,噪声估计系数 κ 为小于 1 的实数.

目标图像修正方法保留了处于空间限制范围内的恢复图像,使用误差补偿策略获得修正图像剩余部分的取值.将修正图像 $x_{k+1}(m,n)$ 代入式(9),重复后续运算,经多次迭代循环获得空间目标的最优图像.为保证相位正则项改进算法的相位恢复过程稳定性与鲁棒性,使得恢复结果能够稳定于特定位置而不出现震荡状态,优化过程中相位正则项系数 η 和噪声估计系数 κ 应随迭代次数的增加而减小.

PCR 算法适用于对目标进行强度相干阵列探测,已获得多点光强涨落测量值的情况.在运算过程中,由测量值进行二阶相关运算获得频谱模值以及高阶相干运算得到高阶相干中心项,代入 PCR 算法进行目标函数优化,并将频谱模值边界条件用于后续迭代,得到最优恢复图像.

3 实验验证

利用与文献[20]相同的强度相干成像室内模拟实验系统,通过比较 PCR 相位恢复算法与原有的最速下降算法、先验信息迭代算法^[4] (Prior Information Iteration, PII) 对相同测量数据的图像恢复结果,验证 PCR 算法改进的有效性.选用如图 8(a) 的金属板镂空图案作为成像目标,用赝热光源代替普通热光对模拟目标进行照明,降低光强涨落频率;利用面阵 CCD 代替高频探测器阵列进行探测,模拟地基观测阵列对远距离目标的强度相干成像.实验过程中 CCD 采集的每帧图像均包含观测面上的所有光强随机涨落,如图 8(b).对 CCD 输出图像进行二重和三重自相关运算即可获得目标的功率谱及高阶相关度分布.

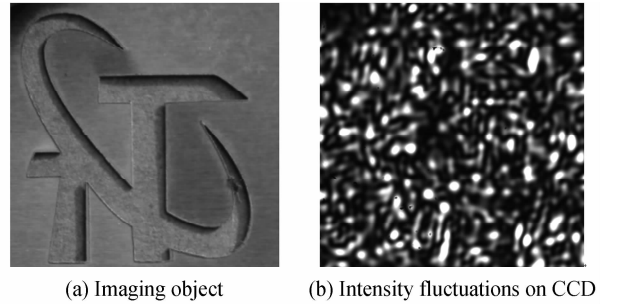


图 8 CCD 采集获得的目标光强涨落值
Fig. 8 Object intensity fluctuations collected on CCD

分别利用最速下降法、PII 算法和 PCR 改进算法对目标图像进行恢复,恢复结果如图 9.由于强度相干方法是一种非传统的干涉成像方法,其成像质量无法用一般的波前成像方法的衡量标准进行评价.在这里,利用目标的原始图像作为参考图像,将三种算法得到的恢复图像分别与参考图像进行比较,得到一个量化的结果.

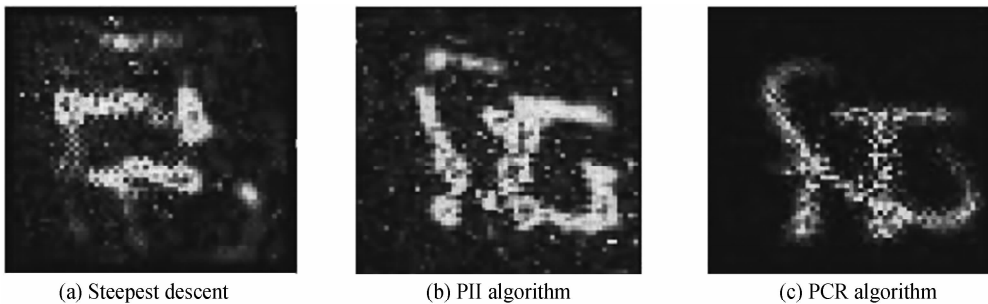


图 9 三种相位恢复算法下的重构图像
Fig. 9 Reconstructed images by three phase retrieval methods

由图 9 可比较明显地看出,三个恢复图像存在灰度分布区间不相同的问题,这是由相位恢复过程中引入的第二类歧义图像造成的,这一类成像结果的平移和镜像旋转不会对成像质量产生影响.为真实地比较最终成像结果,根据文献[4],将图像误差函数设定为

$$E_{\text{imag}} = \min_{x_0, y_0} E^2(g; x_0, y_0) = \min_{x_0, y_0} \left\{ \begin{array}{l} \frac{r_{gg}(0,0) + r_{ff}(0,0) - 2\text{Re}[r_{fg}(x_0, y_0)]}{r_{ff}(0,0)}, \\ \frac{r_{gg}(0,0) + r_{ff}(0,0) - 2\text{Re}[r_{fg}(x_0, y_0)]}{r_{ff}(0,0)} \end{array} \right\} \quad (12)$$

求解三幅图像各自的误差函数值分别为 0.85, 0.63, 0.48, 可知第三幅的图像误差函数最小, 即在测量数据噪声不变情况下, PCR 算法的误差函数值小于 PII 算法和最速下降法, 验证了 PCR 算法改进的有效性. 对应直观的目标图像, 可见边界更为清晰, 细节更加明显, 对背景光噪声抑制更好, 恢复图像质量得到提高.

4 结论

在建立基于符合计数法的高阶相干模型的基础上, 本文对高阶相干相位测量信噪比进行了定量讨论, 认为三阶相干方法在空间目标成像中相位测量的信噪比最为理想, 成像可行性最高. 进而针对三阶相干相位测量过程中存在的频谱传递噪声大等问题, 对原有相位测量方法进行改进, 提出相位闭合正则项改进算法 PCR, 结合相位测量与相位恢复方法各自的优点, 充分利用相位测量信息与图像空域限制条件, 通过最优化算法求解目标图像.

在相位恢复过程中引入由高阶相干测的闭合相位信息, 有效地降低了歧义图像的出现概率, 减小了频谱测量噪声对恢复图像的影响. 通过已有强度相干成像室内实验系统, 对 PCR 改进算法进行验证. 实验结果表明, 在测量数据噪声不变情况下, 相较于最速下降法与先验信息迭代算法, 改进的 PCR 算法可有效提高相位恢复准确度, 改善恢复图像质量, 实现对目标的强度相干成像.

参考文献

- [1] ZHOU Yan-ping, TAO Kun-yu, SHU Rui, *et al.* Study of photoelectric detecting and identifying of space target[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(1):68-67.
周彦平, 陶坤宇, 舒锐, 等. 空间目标光电探测与识别技术的研究[J]. *光学技术*, 2007, **33**(1):68-73.
- [2] ZHANG Jing-xu. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes[J]. *Chinese Optics*, 2012, **5**(4):327-336.
张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. *中国光学*, 2012, **5**(4):327-336.
- [3] MILLOUR F. All you ever wanted to know about optical long baseline stellar interferometry, but were too shy to ask your adviser[J]. *New Astronomy Reviews*, 2008, **52**(2-5):177-185.
- [4] GAO X, FENG L, LI X. An improved image reconstruction method for optical intensity correlation imaging[J]. *Optics Communications*, 2016, **380**:452-461.
- [5] FONTANA P R. Multidetector intensity interferometers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1983, **54**(2):473-480.
- [6] WENTZ T, SAHA P. Feasibility of observing Hanbury Brown and Twiss phase[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, **446**(2):2065-2072.
- [7] DRAVINS D, LEBOHEC S. Stellar intensity interferometry: Prospects for sub-milliarcsecond optical imaging[J]. *New Astronomy Reviews*, 2012, **56**(5):143-167.
- [8] 吕乃光. 傅里叶光学(第2版)[M]. 机械工业出版社, 2006.
- [9] ZALEVSKY Z, MENDLOVIC D, DORSCH R G. Gerchberg-Saxton algorithm applied in the fractional Fourier or the Fresnel domain[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(12):842-844.
- [10] BAUSCHKE H, COMBETTES P L, LUKE D R. Phase retrieval, error reduction algorithm, and Fienup variants: a view from convex optimization. [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2002, **19**(7):1334-1345.
- [11] GUIZAR SICAIROS M, FIENUP J R. Understanding the twin-image problem in phase retrieval[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, **29**(11):2367-2375.
- [12] ZHOU Y, SIMON J, LIU J, *et al.* Third-order correlation function and ghost imaging of chaotic thermal light in the photon counting regime[J]. *Physical Review A*, 2010, **81**(4):1334-1342.
- [13] CAO D Z, XIONG J, ZHANG S H, *et al.* Enhancing visibility and resolution in Nth-order intensity correlation of thermal light[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(20):013802.
- [14] MARATHAY A S. Phase function of spatial coherence from second-, third-, fourth order intensity correlations[J]. *Optical Engineering*, 1994, **10**(33):3265-3271.
- [15] BARAKAT R. Imaging via the van cittert zernike theorem using triple-correlations[J]. *Journal of Modern Optics*, 2009, **47**(10):1607-1621.
- [16] MALVIMAT V, WUCKNITZ O, SAHA P. Intensity interferometry with more than two detectors? [J]. *Monthly*

notices of the Royal Astronomical Society, 2014, **437**(1):798-803.

- [17] BRANNING D, BHANDARI S, BECK M. Low-cost coincidence-counting electronics for undergraduate quantum optics [J]. *American Journal of Physics*, 2007, **77**(77):667-670.
- [18] GLAUBER R J. One hundred years of light quanta (Nobel lecture[J]). *Review of Modern Physics*, 2007, **78**(1):1267-1278.
- [19] LEBOHEC S, DRAVINS D, ADAMS B, *et al.* Stellar intensity interferometry: experimental steps toward long-baseline observations[C]. SPIE, 2010, 7734:77341D.
- [20] GAO Xin, LI Xi-yu, WANG Bin, *et al.* Improved experiment method for intensity correlation imaging in laboratory[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(1):83-92.
高昕, 李希宇, 王斌, 等. 改进的强度相干成像室内实验方法[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(1):83-92.