

doi:10.3788/gzxb20154406.0611002

# 面向高轨目标成像的强度相干阵列优化

李希宇, 高昕, 唐嘉, 冯灵洁

(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)

**摘 要:** 对高轨目标成像时为减小恢复图像中的噪音, 需对相干阵列系统参量进行优化以提高强度相干成像质量. 根据强度相干原理分析空间频谱测量噪音和相位恢复噪音产生的原因, 在高频探测器数量固定情况下, 分析相干阵列的集光面面积、探测器排布间距等参量对成像质量的影响. 通过室内实验, 研究最优集光面面积和最短观测基线的选取方法. 实验结果表明: 对于 14 星等的地球同步轨道卫星, 阵列最短基线长度为光场横向相干长度 0.61 倍, 集光面直径为光场横向相干长度的 0.46 倍时可获得最佳成像效果. 对阵列的优化能够提高强度相干成像质量.

**关键词:** 空间目标成像; 强度相干; 相位恢复; 阵列优化; 散粒噪音; 部分相干

中图分类号: O438.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)06-0611002-7

## Amelioration of Intensity Correlation Array towards High-Orbit Satellite Imaging

LI Xi-yu, GAO Xin, TANG Jia, FENG Ling-jie

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

**Abstract:** In order to reduce the noise of reconstituted image when imaging high orbit satellites with intensity correlation array, research on array amelioration should be done to improve the quality of intensity correlation imaging. According to intensity correlation principle, the reasons of spatial spectrum measurement noise and phase retrieval noise generation were analyzed. Also, the effect of condenser area of intensity correlation array, detector arrangement spacing and other parameters on imaging quality was analyzed in condition that the number of high-frequency detectors was fixed. The selecting methods of optimal condenser area and the observation baseline was discussed by a mockup experiment. As the experiment results indicate: for the 14 Mv geostationary satellite, the optimal image can be obtained when the shortest array baseline length is 0.61 times as long as the transverse coherence length, and the condenser diameter is 0.46 times as long as the transverse coherence length. The intensity correlation imaging quality can be largely improved by array amelioration.

**Key words:** Space object imaging; Intensity correlation; Phase retrieval; Array amelioration; Shot noise; Partially coherence

**OCIS Codes:** 030.6610; 070.1675; 100.3175; 100.5070

## 0 引言

对目标更高分辨力的探测与成像是测控设备的发展方向, 目前对空间目标的高分辨力成像主要依靠地基大口径望远镜<sup>[1]</sup>, 然而受望远镜衍射极限和大气湍流限制, 进一步提高地基望远镜的成像分辨力在技术

和经济上存在较大困难<sup>[2]</sup>. 为获得中高轨卫星的高分辨力图像, 需对新型成像技术进行探索.

干涉成像方法是一种发展中的高分辨力成像手段, 此方法通过测量目标的空间频谱获得目标图像, 可在不增大成像系统口径前提下获得较高的成像分辨力<sup>[3]</sup>, 针对恒星与高轨卫星的干涉成像方法主要有振

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

第一作者: 李希宇(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为强度相干成像技术. Email: lixiyu19900910@163.com

导师(通讯作者): 高昕(1973-), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为飞行器光学测量及成像技术. Email: gaixin526@sina.com

收稿日期: 2014-12-09; 录用日期: 2015-04-30

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

幅干涉成像<sup>[4]</sup>、傅里叶望远镜成像<sup>[5]</sup>和强度相干成像<sup>[6]</sup>,其中强度相干法具有设备准确度要求低、成像分辨率高、受大气湍流影响小等优点,在中高轨卫星成像领域具有较大发展前景<sup>[7-8]</sup>.

强度相干方法利用高频探测器阵列测量不同位置上的目标光强随机涨落,计算光强涨落的相关度获得目标图像的频谱模值,经相位恢复获得目标光强分布图像<sup>[9]</sup>.强度相干方法在20世纪60年代出现之初即被应用于恒星角直径测量领域,其最高分辨率可达到毫角秒量级<sup>[10]</sup>.随着探测水平的提高和相位恢复技术的进步,近年来开始利用此方法对恒星和空间卫星成像<sup>[11]</sup>,然而由于中高轨卫星的亮度低且角直径大,利用原有面向恒星成像的强度相干阵列对高轨卫星观测时,获得的目标频谱模值信噪比较低,且相位恢复过程中易出现图像混叠,影响成像质量.

为提高对中高轨卫星的强度相干成像质量,需提高频谱模值测量信噪比和相位恢复质量.目前对对强度相干成像方法的研究主要集中在对强度相干探测方法和相位恢复算法的改进,对此方面的研究可在一定程度上提高强度相干成像质量<sup>[12]</sup>.而在对亮度较低的高轨卫星成像时,强度相干阵列的集光面口径和阵列中探测器排布密度对频谱模值探测信噪比及相位恢复质量有较大的影响.本文根据高轨卫星特点,分析强度相干阵列的排布方式及集光面大小对成像质量的影响,并设计室内实验模拟对高轨目标的强度相干成像过程,对相干阵列的排布方式及集光面口径进行优化,在不增大阵列规模前提下提高对高轨目标的成像质量.

## 1 强度相干成像方法

### 1.1 强度相干成像原理

强度相干成像原理如图1.不同位置的集光器将待成像目标的光强集中到焦点位置,利用窄带滤光片限制观测光谱宽度,使用高频探测器对目标的光强涨落进行采集并转化为相应的光电流,利用模拟乘法器计算不同探测器输出光电流的相关度即可获得目标频

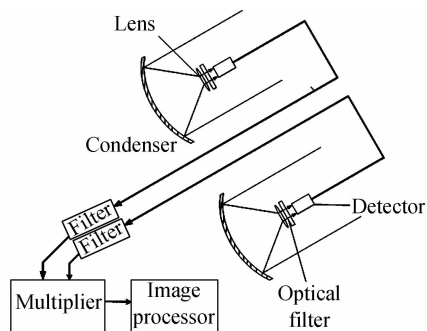


图1 强度相干成像原理

Fig. 1 Diagram of intensity correlation imaging

谱模值.根据中心极限定理可知,高轨卫星反射的自然光场服从复数圆高斯分布<sup>[13]</sup>,根据复高斯矩定理可知,目标光强涨落的相干度可表示为

$$\begin{aligned} \langle I_A(t)I_B(t) \rangle &= \langle E_A(t)E_A^*(t)E_B(t)E_B^*(t) \rangle = \\ &= \langle E_A(t)E_A^*(t) \rangle \langle E_B(t)E_B^*(t) \rangle + \langle E_A(t)E_B^*(t) \rangle \cdot \\ &= \langle E_B(t)E_A^*(t) \rangle = \langle I_A(t) \rangle \langle I_B(t) \rangle [1 + \\ &= |\gamma_{AB}(t)|^2] \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\gamma_{AB}$ 为目标光场空间相干度, $I_A(t)$ 为探测器A上接收的光强涨落, $\langle \rangle$ 表示在时间域内的均值.根据Van Citter-Zernike定理可知,非相干光源的光场空间相干度 $\gamma_{AB}$ 与目标光强分布图像 $I(\xi, \eta)$ 的空间频谱成正比,即

$$\gamma(\Delta x; \Delta y) = \frac{e^{-j\varphi} \iint I(\xi, \eta) \exp \left[ j \frac{2\pi}{\lambda z} (\Delta x \xi + \Delta y \eta) \right] d\xi d\eta}{\iint I(\xi, \eta) d\xi d\eta} \quad (2)$$

而根据式(1)可知,空间目标的光场相干度可通过计算探测面上不同位置的光强涨落相干度获得,即

$$|\gamma_{AB}| = \sqrt{\frac{\langle \Delta I_A \Delta I_B \rangle}{\langle I_A \rangle \langle I_B \rangle}} \quad (3)$$

式中 $\Delta I_A$ 为目标光强涨落的交流部分.由式(2)、(3)可知,利用强度相干阵列采集目标光强涨落后,根据不同光电流之间相关度可计算获得目标的频谱模值 $|\gamma|$ ,若能再获得目标频谱相位,即可对目标图像 $I(\xi, \eta)$ 进行恢复<sup>[14]</sup>.

### 1.2 频谱模值测量噪音分析

与恒星目标相比,高轨卫星的亮度较低且角直径较大,利用地基强度相干阵列对目标成像时,测得的频谱模值中含有较大噪音,严重影响成像质量.其中频谱模值的测量噪音主要包括探测器散粒噪音、暗电流噪音和背景光噪音,其中散粒噪音是高轨目标频谱模值测量过程中的主要噪音<sup>[15]</sup>.利用强度相干阵列对暗弱高轨目标成像时,通过窄带滤光片后到达探测器上的光强较弱,在一个采样周期内高频探测器接收获得的光子数极少,输出光电流中含有较大的散粒噪音.而不同探测器上的散粒噪音相互独立,经相关运算后,探测器散粒噪音仅会在测量结果中引入零均值的高斯噪音.在不考虑部分相干测量误差、背景光噪音及探测器暗电流噪音情况下,强度相干成像方法的探测信噪比表示为<sup>[15]</sup>

$$\text{SNR} = A\alpha n |\gamma|^2 \sqrt{\Delta f T / 2} \quad (4)$$

式中 $A$ 为集光面面积, $\alpha$ 为探测器量子效率, $n$ 为单位光谱宽度内的光子密度, $\Delta f$ 为探测器采样频率, $T$ 为探测积分时间.然而对高轨目标观测时,观测时间不能无限延长,设备的光强探测器量子效率和采样频率受探测器制造工艺限制提升困难,而通过增加强度相干阵列的集光面面积可增强探测器的接收光强,提高频谱模值探测信噪比.

然而现有高轨目标的角直径较大,利用过大的集光面面积对光强涨落进行采集时,会在测量结果中引入部分相干测量误差,同时过大的集光面口径将导致阵列最短观测基线增长,降低系统成像视野和相位恢复质量.为提高强度相干成像质量,需选择适当大小的集光面,在保证相位恢复质量的同时提高频谱模值测量准确度.

### 1.3 相位恢复质量分析

根据式(3)可知,利用强度相干法仅能测得目标图像的频谱模值,需结合频谱相位才能获得目标图像.目标的频谱相位可通过高阶相干测量方法或相位恢复方法获取.由于中高轨目标的亮度较低,利用高阶相干方法获得的频谱相位信噪比较低<sup>[16]</sup>;而空间目标先验信息较多,根据测得频谱模值和图像先验信息可较好地估计频谱相位,因此在对高轨目标的强度相干成像中,通常采用相位恢复方法获得目标图像.

利用地基相干阵列测得的目标空间频谱非周期且非连续,经傅里叶逆变换后的结果为周期离散图像.相位恢复过程中,目标图像可看成待求解的实数矩阵  $\mathbf{I}$ ,其空间频谱为满足共轭对称条件的复数矩阵  $\mathbf{X}$ ,若测得频谱模值矩阵大小为  $N \times N$ ,目标图像和频谱模值的关系可表示为

$$\mathbf{I}(x, y) = N^{-2} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} |X(u, v)| e^{\Phi(u, v)} e^{j2\pi(ux+vy)/N} \quad (5)$$

式中  $\Phi(u, v)$  为目标空间频谱相位矩阵.由于目标频谱矩阵  $\mathbf{X}$  共轭对称,测量矩阵  $|\mathbf{X}|$  中仅有  $N^2/2$  个独立变量.在频谱相位未知情况下,式(5)的解集  $\mathbf{I}_{\text{re}}$  中独立变量数目较多,无法获得目标真实图像.

现有相位恢复算法根据目标图像矩阵的先验信息  $\mathbf{I}_{\text{prior}}$  和频谱模值矩阵  $|\mathbf{X}|$  对目标图像矩阵进行求解:利用图像矩阵的先验信息减少式(5)解集中独立变量个数,以提高目标图像  $\mathbf{I}$  的质量.在相位恢复过程中,需至少获得目标图像矩阵中的  $N^2/2$  个变量值才能保证式(5)有唯一解.待求解矩阵的先验信息  $\mathbf{I}_{\text{prior}}$  越多,相位恢复准确度越高,获得的图像质量越好<sup>[17]</sup>.由于式(5)的维度较高,对方程直接求解难度较大,同时利用强度相干方法测得的高轨目标频谱模值  $|\mathbf{X}|$  中含有大量噪音,直接求解式(5)获得的目标图像会对测量噪音产生过拟合,降低恢复图像质量.为简化相位恢复过程同时减小测量噪音对恢复图像的影响,通常将式(5)的求解过程简化成限定性最优化求解问题,即

$$\begin{aligned} \mathbf{I}^+ = \operatorname{arccin} \{ & | \operatorname{DFT}[\mathbf{I}_{\text{re}}(x, y)] | - | \mathbf{X}(u, v) | \}^2 \\ \text{s. t. } & \begin{cases} \mathbf{I}_{\text{re}}(x, y) = 0 & x \subset S \\ \mathbf{I}_{\text{re}}(x, y) \geq 0 & x \not\subset S \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $S$  为目标图像矩阵中确定可知的背景区域,在限定性条件内求解式(6)的全局最小值即可实现对频谱相位的恢复,获得目标图像.

## 2 强度相干阵列优化

强度相干成像质量取决于系统理论分辨力、频谱模值测量准确度和相位恢复质量<sup>[18]</sup>.在对高轨目标成像时,增长阵列观测基线长度可提高成像系统的分辨力,提高阵列探测器排布密度能够获得较大的成像视野,提高相位恢复质量,增加阵列集光面面积可提高频谱模值探测信噪比.

然而在强度相干阵列探测器数目一定时,系统最长基线长度和探测器排布密度成反比,且探测器排布密度限制了集光面的最大口径.在提高相位恢复质量的同时会降低成像系统的最高分辨力和频谱模值测量准确度.为获得较好的强度相干成像结果,需根据目标特点对阵列的集光面口径及阵列探测器排布密度等参量进行优化.

### 2.1 集光面面积优化

为获得高质量的目标图像,需对强度相干阵列的集光面面积进行优化以减小频谱模值的测量噪音与系统误差,提高频谱模值测量准确度.

由式(4)可知,利用强度相干阵列对暗弱目标成像时,需使用大口径集光面采集目标光强涨落,以减小探测器散粒噪音,提高频谱模值探测信噪比.在对高轨目标观测时,若集光面面积大于观测面上的光场相干面积,会使得集光面上各处光强涨落不完全相同,测得频谱模值中含有部分相干误差,影响频谱模值测量准确度.

对于非相干光源照射的高轨目标,观测平面上的光场相干面积表示为

$$A_c = (\lambda z)^2 / A_s = \lambda^2 / \Omega_s \quad (7)$$

式中  $\lambda$  为观测波长,  $z$  为观测平面到目标平面的距离,  $A_s$  为目标面积,  $\Omega_s$  为目标立体角.由式(7)式可知,目标的角直径越大,测量平面上光场相干面积越小,当集光面相同时,部分相干测量误差越大.由于高轨目标的角直径远大于恒星目标,强度相干测量结果受部分相干误差影响较大,在对高轨目标成像时,需选用适当大小的集光面以减小测量结果的均方误差,提高测量准确度.

利用大口径集光面采集获得的光强涨落为集光面上各处光强涨落的叠加,若强度相干阵列中两集光面面积分别为  $A_1$  和  $A_2$ ,测得光强涨落相关度  $\Delta|\gamma|^2$  表示为

$$\Delta |\gamma|^2 = \frac{1}{A_1 A_2} \iiint \left[ \frac{\iint I(\xi, \eta) \exp \left[ j \frac{2\pi}{\lambda z} (\Delta x \xi + \Delta y \eta) \right] d\xi d\eta}{\iint I(\xi, \eta) d\xi d\eta} \right]^2 dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 \quad (8)$$

当两集光面面积相同时,含有部分相干误差的测量结果  $\Delta |\gamma|^2$  表示为真实值  $|\gamma|^2$  与集光面自相关的卷积

$$\Delta |\gamma|^2 = \frac{\gamma^2}{A^2} \otimes A \otimes A \quad (9)$$

式中  $\gamma$  为目标的真实空间频谱,  $\otimes$  代表卷积运算,  $A$  为系统集光面面积. 根据式(9)可知,部分相干效应引入的频谱模值测量误差与目标的真实空间频谱模值分布有关,近似与相干阵列的集光面面积成正比.

综合考虑探测散粒噪音及部分相干测量误差,强度相干阵列获得的频谱模值测量均方误差表示为

$$\sigma_{\text{sum}}^2 = \sum \left[ \left( |\gamma|^2 - \frac{\gamma^2}{A^2} \otimes A \otimes A \right) + \frac{\sigma_{\text{shot}}^2(\alpha, T, n, f)}{A^2} + \sigma_{\text{others}}^2 \right] \quad (10)$$

式中  $\sigma_{\text{shot}}^2(\alpha, T, n, f)$  为利用单位面积集光面对目标强度相干成像时,散粒噪音引入的高斯白噪音方差. 调整集光面面积  $A$ , 可减小频谱模值的均方误差, 提高频谱模值探测准确度. 对集光面面积的优化涉及目标亮度及频谱模值分布、观测积分时间和光强探测器参量.

## 2.2 阵列排布优化

对强度相干阵列集光面的优化仅能提高目标频谱模值测量准确度,为获得目标的清晰图像,仍需对强度相干阵列的排布密度进行优化,以保证恢复图像的成像分辨力及相位恢复质量.

由于强度相干法仅能获得目标的离散空间频谱模值,经傅里叶逆变换后获得目标的周期图像. 目标图像周期可等效为强度相干成像视野. 根据离散傅里叶变换规律可知,测量获得的频谱模值在  $U$ - $V$  平面上越密集,恢复图像的周期越大,成像视野越大. 而强度相干阵列中探测器排布密度与  $U$ - $V$  平面上频谱模值采样密度成正比,缩短观测阵列的最短观测基线长度可提高频谱模值采样密度,增大成像视野. 强度相干方法视野  $\omega$  与阵列最短观测基线长度  $l_{\min}$  的关系表示为

$$\omega_{\max} = \frac{\lambda L}{l_{\min}} \quad (11)$$

式中  $\lambda$  为观测波长,  $L$  为观测平面到目标平面的距离. 由于高轨目标的角直径较大,为防止在成像过程中发生图像混叠,应保证成像视野大于目标角直径. 在 550 nm 波段对直径 10 m 的地球同步轨道卫星进行成像时,为保证强度相干成像过程中不发生混叠,阵列的最短测量基线长度需小于 2 m.

在相位恢复过程中,图像的空间限制条件在恢复图像中所占比例越大,恢复获得的目标图像中独立变量越小,恢复图像质量越高. 强度相干阵列的最短基线

长度越短,恢复图像视野越大,相位恢复过程中的图像先验信息越多. 为降低恢复图像中独立变量个数、减小歧义图像出现概率,至少需保证待恢复图像中空间限制条件  $S$  的空间维度数目大于  $N^2/2$ . 在对空间目标成像时,强度相干成像视野  $\omega$  需大于目标尺寸  $\omega_{\text{obj}}$  的  $\sqrt{2}$  倍,此时强度相干阵列中最短基线长度需满足

$$l_{\min} \leq \frac{\sqrt{2} \lambda L}{2 \omega_{\text{obj}}} \quad (12)$$

进一步的缩短强度相干阵列的最短观测基线长度可提高相位恢复质量,在频谱模值测量信噪比较低情况下,通常采用较高的阵列排布密度以提高相位恢复质量和成像质量. 在 550 nm 波段对直径 10 m 的地球同步轨道卫星进行成像时,为保证成像过程中的相位恢复质量,需保证观测阵列的最短测量基线长度小于 1.4 m.

然而在强度相干阵列探测器数量及阵列排布方式不变情况下,提高阵列中探测器排布密度将导致阵列的最长基线长度减小,降低强度相干阵列的成像质量. 使用由  $3N+1$  个高频探测器组成的 T 型强度相干阵列对目标进行强度相干成像时,最短观测基线长度为  $l_{\min}$ , 系统的最长基线长度为  $\sqrt{2} N l_{\min}$ , 其理论成像分辨力为  $\delta\omega = \frac{\lambda L}{\sqrt{2} N l_{\min}}$ . 同时当强度相干阵列的最短观测基线较短时,将限制阵列集光面的口径,使得频谱模值探测信噪比降低. 为获得目标的高分辨力图像,需根据目标大小和亮度,合理选择系统的最短基线长度,在保证阵列成像分辨力和集光面面积的前提下增大成像视野,提高成像质量.

强度相干阵列的排布方式也直接影响着测得频谱模值的分布范围和探测信噪比,对最终成像质量有着较大影响. 现有的强度相干阵列排布方式主要有以 T 型阵列为代表的微冗余基线阵列和以密集阵型为代表的强冗余基线阵列. 在探测器数目和排布密度不变情况下,利用微冗余阵列对目标成像时能够获得较高成像分辨力,但测得的频谱模值信噪比较低;利用强冗余阵列对目标观测时,达到相同成像分辨力所需的高频探测器数量较多,但由于观测阵列中冗余基线的存在,可实现对目标单一频谱模值的多次测量,能有效提高频谱模值探测信噪比. 利用地基强度相干成像阵列对高轨目标成像时,通常采用强冗余观测阵列对目标进行观测,以提高目标频谱模值探测信噪比.

## 3 模拟实验与结果

根据阵列优化理论分析可知,在强度相干阵列规

模一定情况下,对阵列集光面口径和阵列排布密度的优化可提高频谱模值探测信噪比和相位恢复质量,改善成像效果.然而强度相干阵列的最优集光面面积与相干阵列探测器性能、被观测目标亮度与角直径、真实频谱模值分布有关,难以通过数学方法对最优集光面面积进行求解.同时,利用现有相位恢复方法对目标图像进行相位恢复时,算法具有较强的非线性和多解性,难以建立频谱模值测量准确度及图像先验信息比例与恢复图像质量的数学关系,无法通过相位恢复数学模型直接对强度相干阵列排布方式进行优化.

为实现对强度相干阵列集光面口径与阵列排布密度的优化,利用室内强度相干成像实验平台,模拟地基强度相干阵列对高轨目标的成像过程,改变实验系统的集光面大小和阵列探测器排布密度对目标进行成像,比较成像结果以获得对高轨目标成像的最优集光面面积和最优阵列排布间距.

传统强度相干成像方法中需采用大量高频探测器采集目标光强涨落,实验过程中阵列基线配置困难,成像视野较小且数据处理困难<sup>[19]</sup>.本文使用赝热光源对目标进行照明以降低光强随机涨落频率,利用 CCD 代替高频探测器阵列采集目标光强涨落.实际搭建的室内强度相干成像平台如图 2,其中激光光源和旋转毛玻璃片构成赝热光源,光源中心波长为 532 nm,产生赝热光的光强随机涨落频率为 10 Hz, CCD 阵列大小为 2 048×2 048,像元尺寸为 6.5 μm,成像过程中 CCD 采样频率为 10 Hz,曝光时间为 30 ms.待成像目标和成像阵列间的距离为 1.6 m.在强度相干成像模拟中,CCD 相机的每个像素均等效成一个高频探测器,改变 CCD 的 bin 模式状态可模拟不同面积的集光面,从 CCD 阵列中抽取特定像素组成阵列可模拟不同排布方式的强度相干阵列,以此验证阵列集光面面积和排布的改变对成像质量的影响<sup>[20]</sup>.

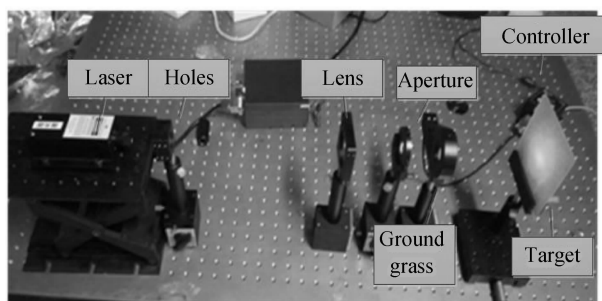


图 2 强度相干成像实验设备图

Fig. 2 Experiment installation of intensity correlation imaging

### 3.1 集光面面积优化实验

利用室内强度相干成像平台,在目标形状大小、亮度与阵列排布方式不变情况下,仿真相干阵列集光面面积与最终成像质量的关系.实验过程中根据等比缩

放原则,仿真利用由 256×256 强度相干阵列对目标进行观测,观测目标为直径 6.1 m,亮度 14 星等的 GEO 卫星,探测器量子效率为 0.8,室内实验系统参量和模拟实际系统参量如表 1.

表 1 室内实验系统参量与系统模拟参量  
Table 1 Parameters of experiment installation and simulated system

	System parameters	Simulation parameters
Distance	1.6 m	$3.6 \times 10^7$ m
Target diameter	1 cm	6.1 m
Array scale	256×256	256×256
Shortest baseline	52 μm	1.92 m
Longest baseline	13.312 mm	491.52 m
View field	1.64 cm	10 m
Theory resolution	64 μm	4 cm
Condenser size 1	6.5 μm	24 cm
Condenser size 2	13 μm	48 cm
Condenser size 3	19.5 μm	72 cm
Condenser size 4	26 μm	96 cm
Condenser size 5	32.5 μm	120 cm
Condenser size 6	39 μm	144 cm
Condenser size 7	45.5 μm	168 cm
Condenser size 8	52 μm	192 cm
Time	4 s	1.7 h

使用该实验系统可模拟对 14Mv 的高轨卫星强度相干成像时的频谱模值测量噪音与部分相干误差,实验中未考虑背景光噪音和暗电流噪音对成像结果的影响.在实验中未改变阵列排布方式及成像视野大小,最终成像质量仅与频谱模值的测量准确度有关,通过频谱模值测量准确度衡量强度相干成像质量.图 3 为不同集光面获得的目标频谱模值测量误差和恢复目标图像;图 4 为集光面尺寸为 6.5 μm、39 μm 和 52 μm 时的强度相干成像结果.

根据模拟实验结果可看出,增加相干阵列集光面面积可提高频谱模值探测信噪比,然而采用过大的集光面面积会在测量结果中引入部分相干测量误差,降低频谱模值测量准确度.从图 3 可看出,目标频谱模值

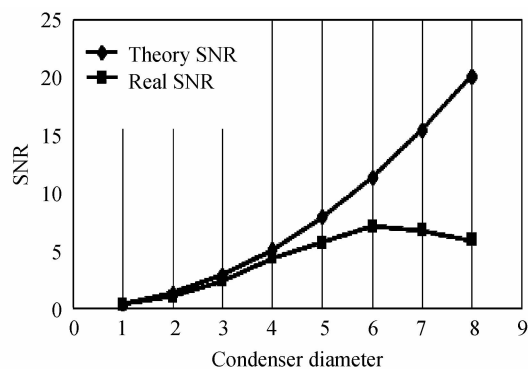


图 3 频谱模值实际测量准确度与理论测量准确度  
Fig. 3 Theory accuracy and real accuracy of object's spatial modulus

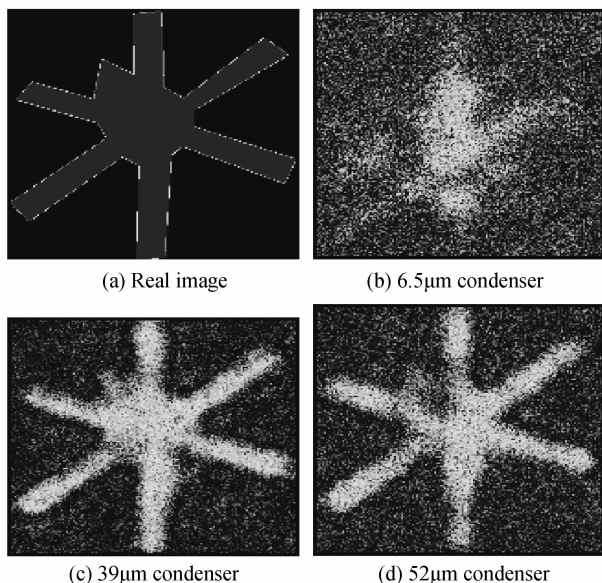


图4 不同大小集光面获得的目标图像

Fig. 4 Image obtained by condensers with different size

测量准确度在集光面直径为  $39\ \mu\text{m}$  时取得最大, 最优集光面直径约为目标横向相干长度的 0.46 倍. 从图 4 可看出, 利用最优集光面阵列获得的目标图像质量较高.

### 3.2 相干阵列排布优化

利用室内强度相干成像实验平台探讨相干阵列排布对成像质量的影响. 由于对高轨目标成像时相干阵列的阵型排布相对固定, 同时在高频探测器一定情况下, 阵列的最长基线长度取决于阵列中探测器排布密度, 因此在对阵列排布优化过程中主要分析探测器排布密度对成像质量的影响.

在强度相干成像模拟实验中, 保持阵列排布方式不变, 改变阵列中探测器排布密度对目标成像. 由于相干阵列的集光面直径需小于相干阵列的最短观测基线, 在改变阵列探测器排布密度时, 根据 3.1 节获得的最优集光面大小及最短基线限制条件选择合适的集光面面积. 在实验过程中模拟了  $128 \times 128$  强度相干阵列对直径 6.1 m、亮度为 14 等的 GEO 卫星的成像过程, 实验过程中系统最短观测基线光场横向相干长度的 0.076 倍到 1.22 倍之间取值, 实验中设定的系统参量如表 2.

由表 2 可知, 当探测器数量和阵型不变时, 提高探测器排布密度可获得较大成像视野, 提高相位恢复质量, 然而过高的探测器排布密度会限制集光面大小, 使得频谱模值探测信噪比降低, 同时减小了强度相干阵列的最长基线长度, 限制系统成像分辨力. 在成像过程中, 若最短探测基线长度小于  $13\ \mu\text{m}$ , 强度相干阵列获得的目标图像小于 2 个像素; 而最短观测基线大于  $85.3\ \mu\text{m}$  时, 系统成像视野小于 1 cm, 恢复获得的目标

表 2 相干阵列系统参量设定

Table 2 System parameters of experiment intensity correlation array

Shortest baseline	View field	Condenser diameter	Longest baseline	Imaging resolution
$6.5\ \mu\text{m}$	13.1 cm	$6.5\ \mu\text{m}$	0.832 mm	10.3 mm
$13\ \mu\text{m}$	6.55 cm	$13\ \mu\text{m}$	1.664 mm	5.13 mm
$26\ \mu\text{m}$	03.27 cm	$26\ \mu\text{m}$	3.328 mm	2.56 mm
$39\ \mu\text{m}$	2.18 cm	$39\ \mu\text{m}$	4.992 mm	1.709 mm
$45.5\ \mu\text{m}$	1.87 cm	$39\ \mu\text{m}$	5.824 mm	1.465 mm
$52\ \mu\text{m}$	1.64 cm	$39\ \mu\text{m}$	6.656 mm	1.28 mm
$58.5\ \mu\text{m}$	1.458 cm	$39\ \mu\text{m}$	7.488 mm	1.14 mm
$65\ \mu\text{m}$	1.312 cm	$39\ \mu\text{m}$	8.32 mm	1.02 mm
$104\ \mu\text{m}$	0.82 cm	$39\ \mu\text{m}$	1.331 2 cm	0.64 mm

图像将产生混叠, 这两种情况均不能获得目标的清晰图像. 当最短基线长度为  $26\ \mu\text{m} \sim 65\ \mu\text{m}$  时可获得较好的目标图像, 恢复图像如图 5. 当探测基线长度不同时, 强度相干成像质量如图 6.

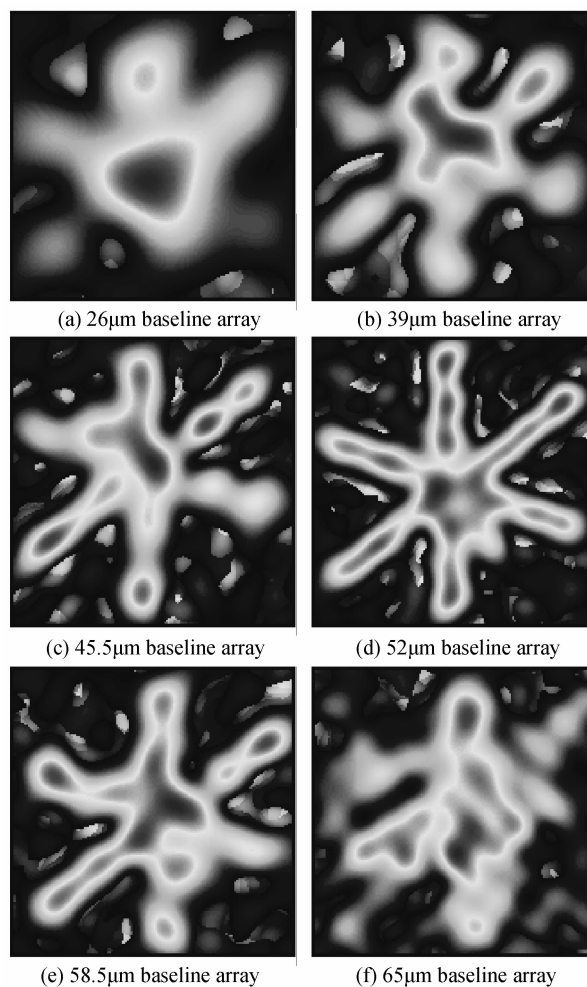


图 5 不同探测器密度对应的成像结果

Fig. 5 Images obtained by arrays with different configuration density

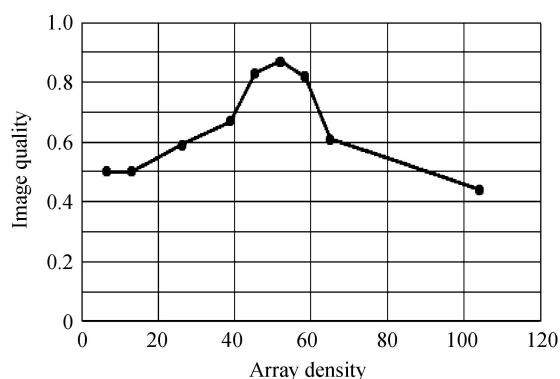


图6 不同探测器密度对应的成像质量

Fig. 6 The quality of images obtained by arrays with different configuration density

当强度相干阵列的最短观测基线长度为  $52 \mu\text{m}$  时,获得目标的最高质量图像,此时最短观测基线长度约为目标光场横向相干长度的 0.61 倍。

## 4 结论

强度相干法能够利用低准确度成像设备实现目标的高分辨力成像,是一种有发展前景的空间目标高分辨力成像手段,然而受频谱模值测量误差和相位恢复噪音影响,该方法难以获得高质量的高轨目标图像。本文根据强度相干成像原理,分析了相干阵列的集光面大小和阵列排布方式对成像质量的影响,并设计了室内模拟实验,对强度相干阵列的参量进行优化。实验结果表明,利用强冗余强度相干阵列对 14 星等的高轨目标成像过程中,相干阵列的集光面口径为光场横向相干长度的 0.46 倍,最短观测基线长度为光场横向相干长度的 0.61 倍时,获得的目标图像质量最佳。

### 参考文献

- [1] ZHOU Chao, YANG Hong-bo, WU Xiao-xia, *et al.* Structural analysis of ground-based large telescopes[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(1): 138-145.  
周超, 杨洪波, 吴小霞, 等. 地基大口径望远镜结构的性能分析[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(1): 138-145.
- [2] YAO Bao-li, LEI Ming, XUE Bin, *et al.* Progress and applications 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.
- [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): 177-185.
- [4] HARM W, ROIDER C, JESACHER A, *et al.* Lensless imaging through thin diffusive media[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(18): 22146-22156.
- [5] DONG Lei, LIU Xin-yue, CHEN Bao-gang, *et al.* Field experiment and result analysis of fourier telescope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1317-1321.
- [6] STREKALOV D V, KULIKOV I, YU N. Imaging dark objects with intensity interferometry[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(10): 12339-12348.
- [7] LI Xi-yu, GAO Xin, TANG Jia, *et al.* Intensity correlation imaging technology for high earth orbit objects[J]. *Journal of Spacecraft TT&T Technology*, 2014, **33**(4): 348-353.  
李希宇, 高昕, 唐嘉, 等. 面向高轨目标的强度相干成像技术研究[J]. *飞行器测控学报*, 2014, **33**(4): 348-353.
- [8] HORCH E P, VAN BELLE G, GENET R M, *et al.* Intensity interferometry for the 21ST century [J]. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2013, **2**(2): 9-19.
- [9] DRAVINS D, LEBHEC S, JENSEN H, *et al.* Optical intensity interferometry with the cherenkov telescope array [J]. *Astroparticle Physics*, 2013, **43**(6): 331-347.
- [10] HANBURY BROWN R, DAVIS J, ALLEN L R. The angular diameters of 32 stars[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1974, **167**(11): 121-136.
- [11] ROU J, NU N EZ P D, KIEDA D, *et al.* Monte carlo simulation of stellar intensity interferometry[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, **430**(4): 3187-3195.
- [12] BORRA E F. A novel type of very long baseline astronomical intensity interferometer[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, **436**(2): 1096-1101.
- [13] GOODMAN J W. Statistical optics [M]. Courier Dover Publications, 2004.
- [14] 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.
- [15] FRIED D L, RIKER J, AGRAWAL B. Signal-to-noise ratio limitations for intensity correlation imaging[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2014, **31**(7): 1536-1546.
- [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] FIENUP J R. Phase retrieval algorithms: a comparison[J]. *Applied Optics*, 1982, **21**(15): 2758-2769.
- [18] BORRA E F. Very long baseline interferometry and observations of gravitational lenses using intensity fluctuations; an analysis based on intensity autocorrelation [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, **440**(3): 1993-1998.
- [19] PELLIZZARI C, HOLMES R, KNOX K. Intensity interferometry experiments and simulations [C]. *Unconventional Imaging and Wavefront Sensing 2012*, San Diego, 2012.
- [20] GAO Xin, LI Xiyu, WANG Bin, *et al.* Improved experiment method for intensity correlation imaging in laboratory[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **23**(1): 138-145.  
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.