中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

Golay3稀疏孔径成像系统共相误差研究

钱俊宏 张蓉竹

Cophasing error of the Golay3 sparse aperture imaging system

QIAN Jun-hong, ZHANG Rong-zhu

引用本文:
钱俊宏, 张蓉竹. Golay3稀疏孔径成像系统共相误差研究[J]. 中国光学, 2023, 16(4): 833–842. doi: 10.37188/CO.2022–0203
QIAN Jun-hong, ZHANG Rong-zhu. Cophasing error of the Golay3sparse aperture imaging system[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 833-842. doi: 10.37188/CO.2022-0203

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2022–0203

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大口径光学合成孔径成像技术发展现状

Review on optical synthetic aperture imaging technique

中国光学（中英文）. 2017, 10(1): 25 https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0025

超分辨率成像荧光探针材料应用进展

Advances in application of materials of super–resolution imaging fluorescent probe

中国光学（中英文）. 2018, 11(3): 344 https://doi.org/10.3788/CO.20181103.0344

大随机相位误差下条带模式合成孔径激光雷达成像实验

Stripmap mode synthetic aperture ladar imaging under large random phase errors condition

中国光学（中英文）. 2019, 12(1): 130 https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0130

地球同步轨道暗弱目标地基光学成像技术综述

Review of ground–based optical imaging techniques for dim GEO objects

中国光学（中英文）. 2019, 12(4): 753 https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0753

高分辨率遥感图像SIFT和SURF算法匹配性能研究

Research on matching performance of SIFT and SURF algorithms for high resolution remote sensing image

中国光学（中英文）. 2017, 10(3): 331 https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0331

光谱成像技术在海域目标探测中的应用

Application of spectral imaging technology in maritime target detection

中国光学（中英文）. 2017, 10(6): 708 https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0708

文章编号　2097-1842(2023)04-0833-10

Golay3 稀疏孔径成像系统共相误差研究

钱俊宏[1,2], 张蓉竹[1*]
（1. 四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065;
2. 成都航空职业技术学院 无人机产业学院, 四川 成都 610065）

摘要: 稀疏孔径成像系统在校正共相误差后可实现多个子孔径干涉成像, 达到提高成像分辨率的目的。本文以 Golay3 稀疏孔径成像系统为研究对象, 分析了子孔径间存在不同活塞误差和倾斜误差时, 系统的 MTF 和面目标成像情况。研制了一套 Golay3 稀疏孔径成像系统, 以 USAF1951 分辨率板为面目标进行了成像实验。通过调整光束折转调整模块中的平面反射镜位置, 校正了子孔径的活塞误差和倾斜误差, 实现了三孔径合成成像, 并对理论分析结果进行了验证。实验结果表明: 所研制系统的角分辨率为 1.77 μrad, 接近于等效单口径成像系统的理论极限分辨率 1.18 μrad。所研制的 Golay3 稀疏孔径成像系统能有效校正共相误差, 提高成像分辨率。

关　键　词: 稀疏孔径成像; 共相误差; 分辨率板; 面目标成像; 角分辨率
中图分类号: O439;　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2022-0203

Cophasing error of the Golay3 sparse aperture imaging system

QIAN Jun-hong[1,2], ZHANG Rong-zhu[1*]
（1. *College of Electronics and Information Engineering*, *Sichuan University*, *Chengdu* 610065, *China*;
2. *School of Unmanned Aerial Vehicles Industry*, *Chengdu Aeronautic Polytechnic*, *Chengdu* 610065, *China*）
* *Corresponding author*, *E-mail*: *zhang_rz@scu.edu.cn*

Abstract: Multiple sub-aperture interference imaging enables the images formed by the sparse aperture imaging system to have a higher resolution after the cophasing error is corrected. In this paper, the MTF and surface target imaging of the system are analyzed with a Golay3 sparse aperture imaging system as the research object when there are different piston and tilt errors among the sub-apertures. A Golay3 sparse aperture imaging system was developed to carry out an imaging experiment with the USAF1951 resolving power test target as the area target. Three-aperture synthetic imaging is achieved by adjusting the position of the plane mirror in the light beam deflection and the adjustment module to correct the piston and tilt errors of the sub-apertures. The results of a theoretical analysis are then verified. According to calculations, the developed system's angular resolution of 1.38 μrad is close to the equivalent single-aperture imaging system's theoretical resolution of 1.18 μrad. The developed Golay3 sparse aperture imaging system can correct the cophasing errors and improve the imaging resolution.

Key words: sparse aperture imaging; cophasing error; resolution target; surface target imaging; angular resolution

收稿日期: 2022-09-26; **修订日期:** 2022-10-26
基金项目: 四川省重大科学仪器设备专项(No. 2019ZDZX0038)
Supported by Major Science and Technology Project in Sichuan Province (No. 2019ZDZX0038)

1 引 言

空间分辨率是评价光学成像系统的主要技术指标，为了提高空间分辨率，势必要增大光学系统的口径。而加工大口径的单镜片，不仅会存在加工难、成本高的问题，并且还会受到光学材料、加工工艺、装夹定位等诸多因素的限制[1-2]。为了解决这一系列问题，科学家们提出了稀疏孔径成像技术[3]。稀疏孔径成像技术包含多个子孔径，通过特定阵列排布的子孔径代替单个大口径主镜[4]。子孔径光束经过折转后汇聚到光束组合器后入瞳，并在像面干涉，经过干涉成像可获得与等效大口径光学系统相同的分辨率。

想要实现子孔径干涉成像，需要精确定位子孔径的安装位置。由于子孔径镜面和机械结构在加工制造、各子系统安装和动态调整过程中不可避免地会产生误差，这些误差会影响子光束之间的共相，给系统带来共相误差[5]。共相误差主要包含活塞误差和倾斜误差，这是影响系统成像效果的关键因素[6]。1986 年，Traub W A 最早对稀疏孔径成像系统的倾斜误差和活塞误差进行了几何光学的建模研究，结果表明，系统的共相误差应小于一个波长[7]。2007 年，Miller N J 等针对 Golay-9 稀疏孔径系统中子孔径存在活塞误差和倾斜误差时的点扩展函数（PSF）和调制传递函数（MTF）进行了分析[8]；2016 年，何小君等对 Golay3 稀疏孔径系统中子孔径存在平移误差和倾斜误差进行了模拟成像，并对活塞误差进行了校正研究[9-10]。2017 年，谢宗良等在实验室内搭建了 Golay3 实验系统，该系统单孔径直径为 127 mm，孔径间距为 180 mm，最小截止频率处的等效口径为 245 mm，理论衍射极限为 3.15 μrad，实测分辨率为 3.33 μrad[11-12]。2018 年，中国科学院国家天文台设计建造了一个斐索成像干涉仪试验台 (FIIT)，在实验室实现了宽带白光 (400−700 nm) 相控成像[13]。该系统 3 个子孔径口径均为 100 mm，孔径间距为 200 mm。实验结果显示：单个孔径不能很好地识别 10 lp/mm 的线对，而三孔径合成图像能较好的识别 20 lp/mm 的线对[14]。目前，国内对于稀疏孔径成像系统的各种实验都是通过在实验室内的隔振台上搭建光路进行的，面向实际工程应用的稀疏孔径成像系统和实验在国内尚未见报道。

本文以三孔径系统为研究对象，仿真分析了当系统存在共相误差时系统 MTF 和成像的变化情况。通过研制的 Golay3 物理系统实现了点目标和面目标成像，计算得出的共相误差结果显示校正后的三孔径合成成像分辨率接近其等效大口径分辨率。

2 Golay3 系统的成像特征

为验证稀疏孔径成像系统性能，本文以 Golay3 型阵列结构为研究对象，其排布形式如图 1 所示[15]。

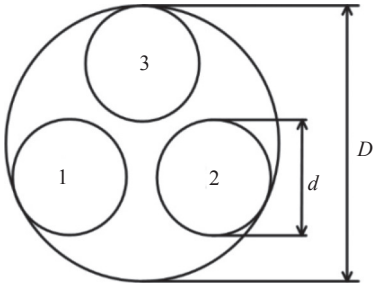


图 1 Golay3 阵列结构

Fig. 1 Golay3 array structure

图 1 中 3 个直径为 d 的子孔径中心分别位于正三角形的 3 个顶点，子孔径的外接圆直径为 D。其光瞳函数为[16]：

$$P(x,y)=circ\left(\frac{\sqrt{\left[x+\frac{\sqrt{3}(D-d)}{4}\right]^2+\left(y-\frac{D-d}{4}\right)^2}}{d/2}\right)+circ\left(\frac{\sqrt{\left[x-\frac{\sqrt{3}(D-d)}{4}\right]^2+\left(y-\frac{D-d}{4}\right)^2}}{d/2}\right)+circ\left(\frac{\sqrt{x^2+\left(y+\frac{D-d}{2}\right)^2}}{d/2}\right). \tag{1}$$

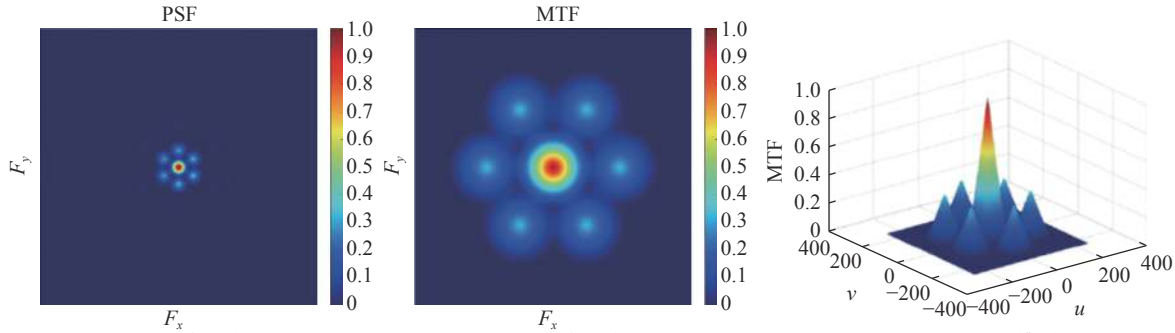
由入瞳函数与调制传递函数的计算关系，可得系统点扩散函数和调制传递函数为：

$$PSF(x,y)=PSF_{\text{one}}(x,y)\cdot\left\{3+2\cos\left[\frac{k}{f}\left(\frac{\sqrt{3}(D-d)}{2}x+\frac{D-d}{2}y\right)\right]+2\cos\left[\frac{k}{f}\left(\pm\frac{\sqrt{3}(D-d)}{4}x+\frac{3(D-d)}{4}y\right)\right]\right\}, \tag{2}$$

$$MTF_{\text{Golay3}}=|P(x,y)\otimes P(x,y)|=MTF_{\text{sub}}+\frac{1}{3}MTF_{\text{sub}}\left[\xi\pm\frac{\sqrt{3}(D-d)}{2\lambda f},\eta\pm\frac{3(D-d)}{4\lambda f}\right]+\frac{1}{3}MTF_{\text{sub}}\left[\xi\pm\frac{\sqrt{3}(D-d)}{2\lambda f},\eta\right]. \tag{3}$$

理想情况下, Golay3 光学系统的 PSF、MTF 平面图和三维图如图 2 所示。

由图 2 可知, Golay3 光学系统的 PSF 受到子孔径衍射和子孔径间的干涉调制, PSF 条纹圆心强度最大, 周围伴有 6 个均匀分布的小旁瓣。Golay3 光学系统的 MTF 由 3 个子 MTF 重叠而成, 中央零频处是 3 个子 MTF 的叠加, 周围 6 个空间频率处 MTF 的峰值是中央频率的 1/3。通过调节 3 个子孔径间的距离可得到系统不同 MTF 的分布情况。



(a) PSF 平面图
(a) PSF planar graph

(b) MTF 平面图
(b) MTF planar graph

(c) MTF 三维图
(c) MTF three-dimensional diagram

图 2　Golay3 光学系统

Fig. 2　Golay3 optical system

稀疏孔径成像系统的稀疏性可用填充因子 F 来表示:

$$F=\frac{\text{所有子孔径面积之和}}{\text{系统外切圆面积}}. \tag{4}$$

当子孔径大小一定, 子孔径距离越远分布越稀疏, 系统填充因子越小。当稀疏孔径望远系统外切圆一定, 各子孔径越小, 系统填充因子越小。填充因子变小会导致系统中频信息响应降低, 填充因子过小则会使 MTF 在截止频率内出现零值。为便于图示直观看出这种现象, 以第二种情况为研究对象, 分析一个理想双孔径系统在不同填充因子下水平方向的 MTF 曲线, 如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 系统截止频率不随填充因子的改变而改变, 但与等效全孔径 MTF 曲线相比, 填充因子 F 值越低, MTF 曲线在中频部分的响应越低。当填充因子等于 0.22 时, MTF 中频区域刚好出现缺失, 因此系统填充因子必须大于 0.22, 以确保中频信息完整保留, 后期通过图像复原算法进行中频改善。

由于稀疏孔径望远系统 MTF 曲线与等效全孔径 MTF 相比中频部分响应降低, 因此需要通过图像复原算法对获得的图像进行中频改善。本文采用维纳滤波算法进行中频改善, 输入的原始

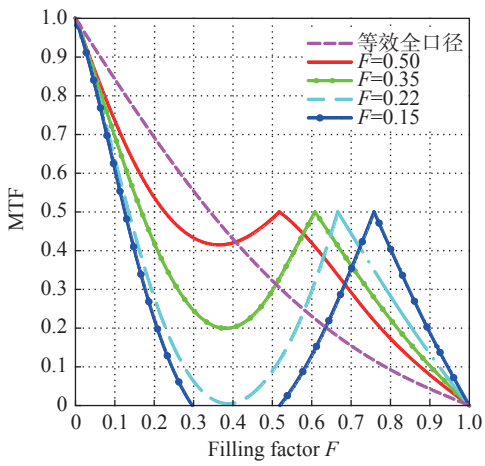
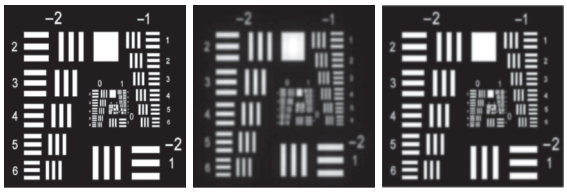


图 3　MTF 随填充因子 F 变化曲线

Fig. 3　MTF varies with the filling factor F

图、稀疏孔径直接观测结果和中频改善后的成像结果如图 4 所示。



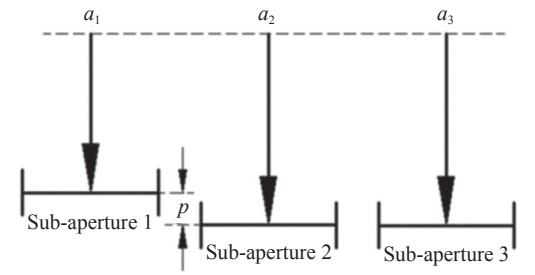
(a) 输入图像 (b) 观测图像 (c) 中频改善后图像
(a) Original image (b) Observation image (c) Improved image

图 4 成像模拟对比结果

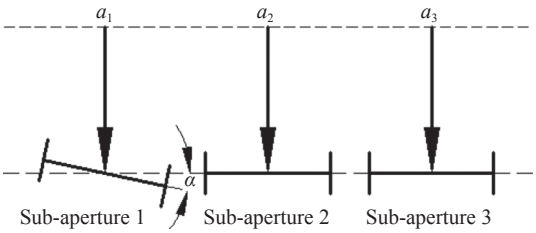
Fig. 4 Imaging simulation comparison results

3 Golay3 系统的共相误差分析

由于加工、装配、振动和环境温度变化等影响因素的存在，使得各子孔径光束间存在共相误差，共相误差主要包括活塞误差和倾斜误差。以三孔径望远系统中的孔径 1 存在平移误差和倾斜误差的情况进行分析。如图 5 所示。



(a) 活塞误差
(a) Piston error



(b) 倾斜误差
(b) Tilt error

图 5 子孔径 1 共相误差

Fig. 5 Cophasing error of sub-aperture 1

图 5 中 a_1、a_2、a_3 分别对应子孔径 1、子孔径 2 与子孔径 3 的位置。活塞误差是由于各子孔径间存在时间延迟或者位相延迟，导致沿着光轴 Z 轴方向多个子光束之间存在的光程差。图 5(a)表示 a_1 的光程差为 p。倾斜误差表示各子光束的波面不平行导致绕着 x 轴或 y 轴存在一定的倾斜角度，图 5(b)表示 a_1 的倾斜误差为 α。

当系统中存在活塞误差和倾斜误差时，光瞳函数表示为：

$$P_{\mathrm{all}}(x,y)=P(x,y)*\sum_{i=1}^{n}\delta(x-x_i,y-y_i)\cdot \exp\frac{2\pi i}{\lambda}\{p_n+[\alpha_n(x-x_i)+\beta_n(y-y_i)]\} \quad . \tag{5}$$

式中，“*”表示卷积，p_n为第n个子孔径相对于参考子孔径的活塞误差，α_n和β_n分别为第n个子孔径沿理想平面 X 轴和 Y 轴方向上的斜率。对于 Golay3 三孔径系统，当子孔径 1 存在0、0.25λ、0.5λ、0.75λ和λ的活塞误差时，系统对应的 MTF 如图 6(彩图见期刊电子版)所示。

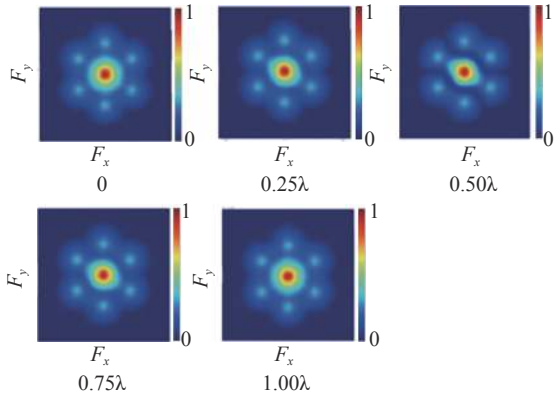


图 6 子孔径 1 存在不同活塞误差时三孔径系统的 MTF

Fig. 6 MTFs of Golay3 optical system when sub-aperture 1 has different piston errors

当子孔径 1 存在 0.25 μrad、0.5 μrad、0.75 μrad 和 1.0 μrad 的倾斜误差时，系统的 MTF 如图 7(彩图见期刊电子版)所示。

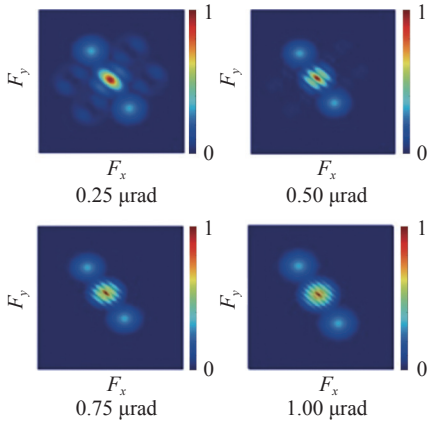


图 7 子孔径 1 存在不同倾斜误差时三孔径系统的 MTF

Fig. 7 MTFs of Golay3 optical system when sub-aperture 1 has different tilt errors

从图 6 和图 7 可以看出, 活塞误差具有周期性, 周期为λ。倾斜误差相比活塞误差对 MTF 的影响更大。衍射受限的非相干成像系统是强度变换的线性系统, 物像关系满足卷积积分[17]:

$$I(x,y)=k\iint_{-\infty}^{\infty} I_g(x_o,y_o)h(x-x_0,y-y_0)\mathrm{d}x_0\mathrm{d}y_0 \quad , \tag{6}$$

式中, k是实常数; I_g为几何光学理想像的强度分布; $I_{(x,y)}$为实际系统像的强度分布; $h(\cdot)$为光强脉冲函数, 即点扩散函数, 是点光源的像斑强度分布。扩展目标的像面光强分布是目标上所有点源产生的像斑按强度叠加的结果。运用 MATLAB 软件模拟光学系统对鉴别率板成像, 分析光学系统分辨率[18]。建立二值矩阵, 并将其作为系统光瞳函数, 光瞳以内点置 1, 以外点置零。对光瞳矩阵做快速傅立叶变换得到系统点扩散函数, 与理想目标像(分辨率板)做卷积运算即可得到模拟像。

以 USAF1951 分辨率板为面目标, 当子孔径 1 存在 0、0.25λ、0.5λ、0.75λ和λ的活塞误差时的成像效果如图 8 所示。

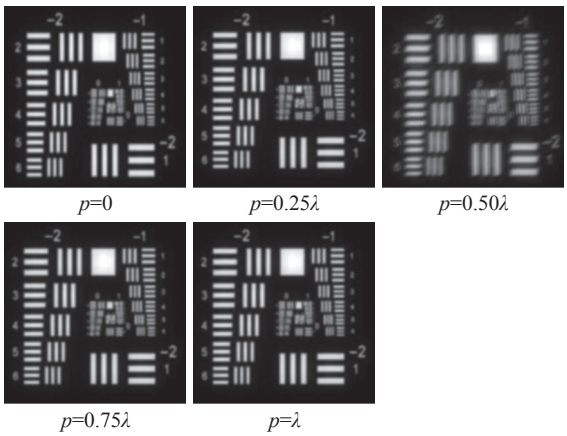


图 8　不同活塞误差下的模拟成像结果

Fig. 8　Simulated imaging results under different piston errors

从图 8 中可以看出, 当活塞误差为 0 时, 成像结果与理想成像结果相同, 在活塞误差从0增大至$\lambda/2$的过程中, 成像结果越来越模糊。当活塞误差从$\lambda/2$增大至λ的过程中, 成像结果又逐渐变清晰, 因此活塞误差呈周期性, 这和图 6 的 MTF 仿真结果一致。

当子孔径 1 存在 0.25 μrad、0.5 μrad、0.75 μrad 和 1.0 μrad 的倾斜误差时的成像结果, 如图 9 所示。从图 9 可以看出, 随着倾斜误差变大, 子孔径 1 的图像越来越偏离理想位置。

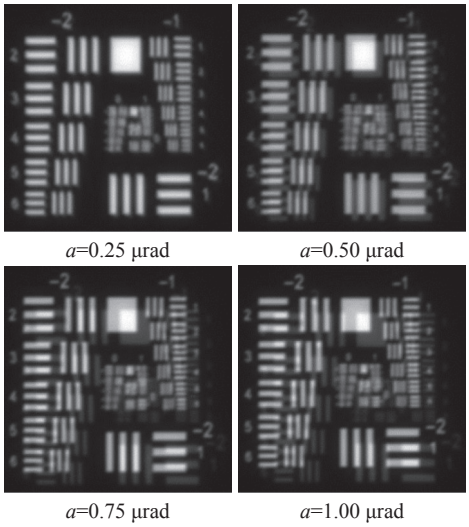


图 9　不同倾斜误差下的模拟成像结果

Fig. 9　Simulated imaging results under different tilt errors

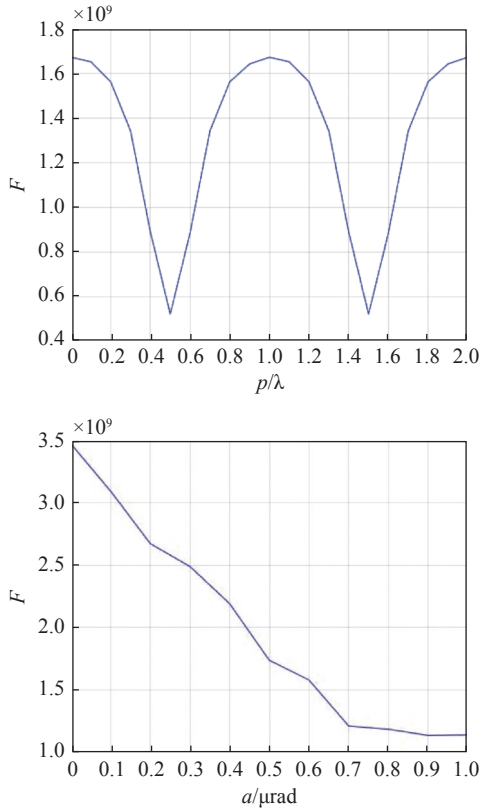


图 10　Tenengrad 图像清晰度评价结果

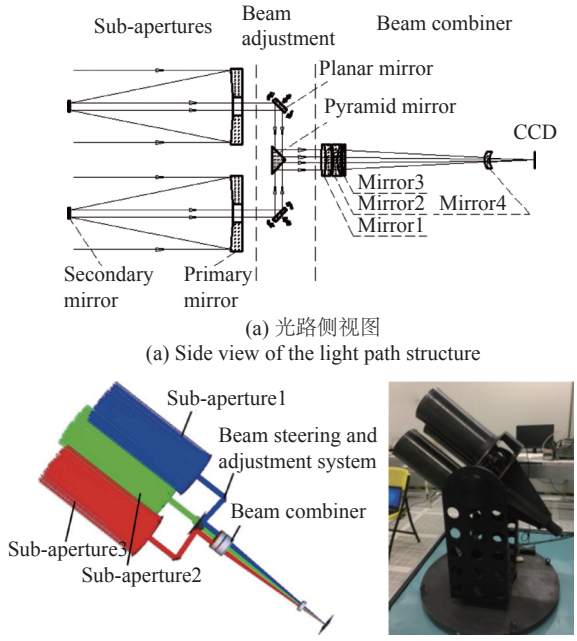
Fig. 10　Tenengrad image sharpness evaluation results

采用 Tenengrad 图像清晰度评价方法对模拟成像进行评价[16], 结果如图 10 所示。从评价结果可以看出, 成像清晰度随活塞误差增大呈周期性变化, 周期为λ, 随着倾斜误差的增大, 清晰度值逐

渐降低，当倾斜误差过大时，评价值基本保持不变。仿真是理想情况下的结果，而实际系统在有各种干扰因素时能否实现共相误差校正，实现干涉成像并达到等效大口径分辨率需要通过实验验证。

4 Golay3 系统成像实验

在充分分析稀疏孔径成像系统原理和误差影响的基础上，设计和制作了面向工程应用的 Golay3 成像系统。通过模块化设计思想，将总系统分为子孔径系统、光束折转调整结构和光束组合器 3 大模块。子孔径系统包含 3 个口径为 d=200 mm 的卡塞格林无焦系统，3 个子孔径的主镜所围成的外切圆直径 D=570 mm[19]。光束折转调整模块包含 3 块平面反射镜和 1 个金字塔镜，平面反射镜用于折转和调整子孔径光束，以校正子孔径的共相误差。光束组合器由 4 块透镜组成，其中前两块为双胶合消色差透镜。系统光路结构和物理模型如图 11 所示，其性能参数如表 1 所示。



(a) 光路侧视图
(a) Side view of the light path structure

(b) 光路图
(b) Light path graph

(c) 物理模型
(c) Physical model

图 11 Golay3 稀疏孔径成像系统

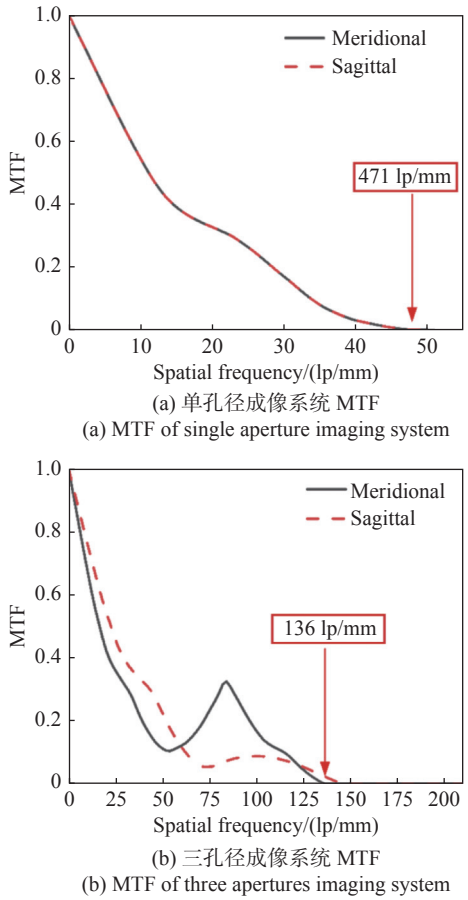
Fig. 11 Golay3 sparse aperture imaging system

单孔 MTF 和三孔径 MTF 的对比结果，如图 12 所示。由图 12 可知，单孔径系统截止频率为 47 lp/mm，所设计的 Golay3 稀疏孔径望远系统最小截止频率为 T 分量，即 136 lp/mm，因此截止频率提高了 2.83倍。根据瑞利准则$\theta = 1.22\lambda/D$，口径为 200 mm 的单孔径极限角分辨率为 3.36 μrad。等效口径为 570 mm 的单孔径极限角分辨率为 1.18 μrad，Golay3 相比单口径极限角分辨率提高了 2.85 倍。单孔径系统和三孔径望远系统的 MTF 曲线均接近衍射极限，证明三孔径望远系统的光学设计已经优化至最佳结果。

表 1 所设计 Golay3 稀疏孔径成像系统设计参数

Tab. 1 Design specifications of the Golay3 sparse aperture imaging system

序号	参数	设计值
1	子孔径口径d	200 mm
2	等效口径D	570 mm
3	系统焦距f	6 000 mm
4	全视场角h	0.2°
5	工作波段	0.48 ~ 0.65 μm



(a) 单孔径成像系统 MTF
(a) MTF of single aperture imaging system

(b) 三孔径成像系统 MTF
(b) MTF of three apertures imaging system

图 12 单孔径和三孔径成像系统 MTF 对比

Fig. 12 Comparison of MTF of a single-aperture and three-apertures imaging system

光束折转调整结构通过一块 45°倾斜的平面反射镜和 45°的三角锥反射镜来实现光路折转，如图 13 所示。三角锥反射镜安装于一个可 XYθ 三自由度调节的微调精密平台上，以确保三角锥位于 3 个子孔径中心。平面反射镜安装在一个压电陶瓷 (PZT)微位移促动器上，并利用支架固定，这三部分共同组成快反镜(FSM)结构，用以调节光路的活塞误差和倾斜误差。

整个调整过程分粗调和精调两步，粗调满足光路的调整范围，精调则满足相位误差控制。粗调采用“三拉三顶”机械式调整结构，如图 14 所示。6 个螺钉分为 3 组，其中螺钉 1-1、2-1、3-1 为拉紧螺钉，同时拧紧可减小 FSM 支架和 PZT 之间的间隙；螺钉 1-2、2-2、3-2 为顶紧螺钉，同时拧紧可增大 FSM 支架和 PZT 之间的间隙。当单独拧 6 颗螺钉中的一颗，PZT 的角度将会得到调整。“三拉三顶”结构三维模型如图 14(b)所示。

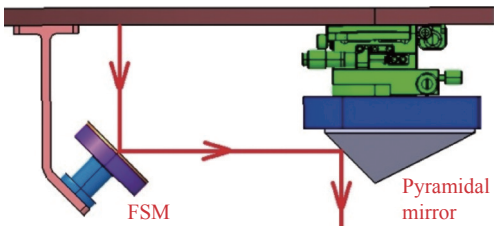


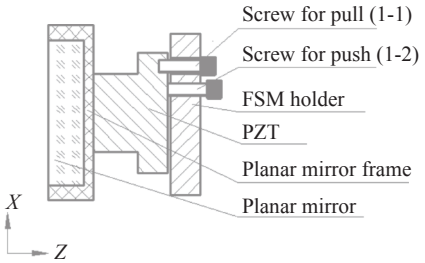
图 13　光束折转调整结构

Fig. 13　Beam steering and adjustment structure

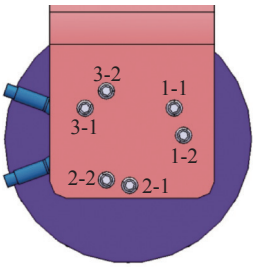
FSM 精调机构选用德国 PI 公司型号为 S-316 的 PZT 实现，其 Z 向平移行程为 12 μm，闭环分辨率为 0.4 nm，倾斜角度行程为 1 200 μrad，分辨率为 0.1 μrad。

系统验证实验时，先进行点目标干涉实验再进行面目标成像实验。利用大口径平行光管模拟无限远点目标，通过各子系统组装调整，以 CCD 像面干涉图为检测对象，实现 3 个子孔光束共焦。精调光束折转调整模块中的平面反射镜位置，使三子孔径光束两两相互干涉，干涉图样如图 15 所示。

干涉需要 3 个条件：光波的频率相同，位相差恒定，振动方向一致。由于 3 个子孔径光束源自同一平行光管光源，因此三束光波的频率相同，振动方向一致。另外，从点目标干涉结果可以得知三光束位相差恒定，但这不能说明三光束共相误差为零，因此需要进行面目标成像实验进一步消除共相误差。利用 USAF1951 分辨率板进行面目标成像实验，面目标输入图像如图 16 所示。



(a) 剖视图
(a) Section view



(b) 三维模型
(b) Three-dimensional model

图 14　FSM 结构

Fig. 14　FSM structure

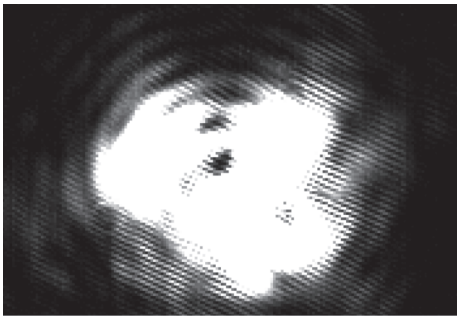


图 15　点目标成像结果

Fig. 15　Point source imaging

通过改变分辨率板的位置，分别在面目标距离系统 10 m、20 m、40 m 和 60 m 时情况下进行成像实验。以分辨率板距离 Golay3 稀疏孔径成像系统 40 m 远的成像结果为例进行分析。关闭子孔径 2 和子孔径 3 的入射光，只有子孔径 1 时的成像结果如图 17(a)所示。当 3 个子孔径都打开时，合成图像如图 17(b)所示，该合成图像存在较大的活塞误差和倾斜误差。以子孔径 1 在 CCD 中的图像为参考，分别调节子孔径 2 和子孔径 3 对应的平面反射镜位置，以校正子孔径 2 和子孔径 3 的活塞误差和倾斜误差，共相误差校正后的合成图如图 17(c)所示。

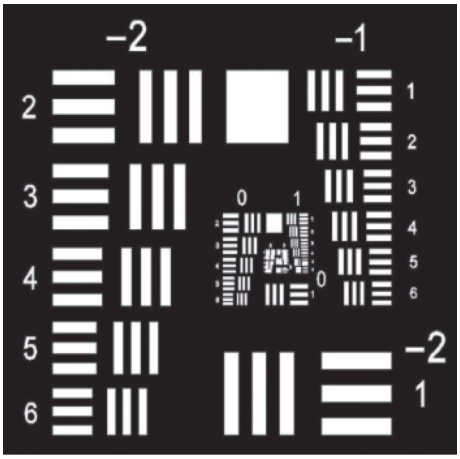
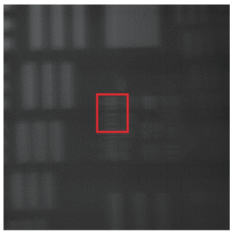
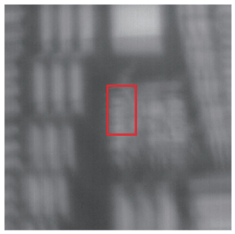


图 16　面目标输入图像

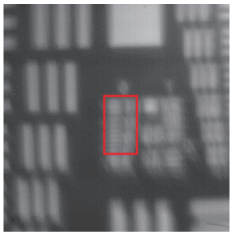
Fig. 16　Input image of surface target



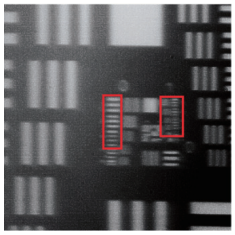
(a) 单孔径成像结果
(a) Single aperture imaging



(b) 存在共相误差的合成图
(b) Three-apertures synthetic imaging with cophasing error



(c) 共相误差校正后
(c) Imaging after the correction of cophasing error



(d) 中频改善后结果
(d) After intermediate frequency improvement

图 17　面目标成像实验结果

Fig. 17　Results of the surface target image source experiment

从实验结果可以看出，单个子孔径成像图的分辨率明显低于三孔径合成图像。通过光束校正系统调节后，系统的倾斜误差和活塞误差基本得到校正。仔细观察图 17(a)，从图中方框中可以分辨出分辨率板 0 组的第 2 元素，查询表可知分辨率为 1.12 lp/mm，条纹间距为 $\Delta d = 1/1.12 = 0.893$ mm，面目标与系统距离 $S \approx 40\,000$ mm，单孔径的实测分辨率为 4.47 μrad。通过观察图 17(d)，能分辨出第 1 组第 4 元素。查询表 2 分辨率板线对数可知，该组为 2.83 lp/mm，则条纹间距 $\Delta l = 1/2.83 = 0.353$ mm。面目标与系统距离 $S \approx 40\,000$ mm，可计算三孔径望远系统实测分辨率为 1.77 μrad。将单孔径和三孔径的理论角分辨率和实测角分辨率进行对比，如表 2 所示。

表 2　理论结果和实测结果对比

Tab. 2　Comparison of theoretical and measured results

参数名称	单孔径	三孔径	提高倍数
极限角分辨率	3.36 μrad	1.18 μrad	2.85
实测角分辨率	4.47 μrad	1.77 μrad	2.53

由此可知：

(1)所研制的三孔径望远系统实测分辨率为 1.77 μrad，接近等效单个大口径理论分辨率 1.18 μrad。

(2)三孔径望远系统的理论极限分辨率为 1.18 μrad，相比单孔径理论极限分辨率 3.36 μrad 提高了 2.85 倍。

(3)三孔径望远系统实测角分辨率为 1.77 μrad，相比单孔径实测角分辨率 4.47 μrad 提高了 2.52 倍。

由于目标分辨率显示屏光强、CCD 分辨率、杂散光、光机结构的加工误差等因素的影响，使得最后的成像结果与理论仿真结果间有一定差距。三孔径与单孔径的参数对比可知，理论角分辨率提高了 2.85 倍，实测角分辨率提高了 2.53 倍，实测结果接近理论值。

5　结　论

本文以 Golay3 型稀疏孔径成像系统为对象，仿真分析了当子孔径 3 存在 0、0.25λ、0.5λ、0.75λ 和 λ 的活塞误差，以及 0.25 μrad、0.5 μrad、0.75 μrad 和 1.0 μrad 的倾斜误差时，系统的 MTF 和面目标的成像结果。仿真结果表明活塞误差和倾斜误差是影响系统成像效果的关键因素。以平行光管模拟无穷远点目标，对研制的 Golay3 稀疏孔径成像系统进行成像实验，实现了三子孔径光束两两相互干涉。以 USAF1951 分辨率板为面目标，通过调整光束折转调整模块中的平面反射镜位置，校正子孔径的活塞误差和倾斜误差，实现了三孔径合成成像。结果表明，实测的 Golay3 稀疏孔径成像系统的角分辨率为 1.77 μrad，与等效的 570 mm 单口径成像系统的理论分辨率 1.18 μrad 接近。

面目标的仿真分析和物理实验结果充分证明系统经共相误差校正后，稀疏孔径成像系统可以提高分辨率。最后，通过面向实际应用的 Golay3 物理系统实验，验证了该技术的良好工程应用前景。

参考文献:

[1] FAN J L, WU Q Y, CHEN B H, *et al*.. Optical design of the Goaly3 multi-mirror telescope system with a wide field of view[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(3): 1200.

[2] LIU T CH, HU J P, ZHU L L, *et al*.. Large effective aperture metalens based on optical sparse aperture system[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(10): 100001.

[3] MEINEL A B. Aperture synthesis using independent telescopes[J]. *Applied Optics*, 1970, 9(11): 2501-2504.

[4] ZHANG L T, LIU M, ZHAO Y J, *et al*.. The optimal design of a binaural sparse-aperture system[J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 102970.

[5] 张超. 稀疏孔径成像系统相位补偿装置结构研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2019.
ZHANG CH. Study of phase compensation device structure for optical sparse-aperture imaging system[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2019. (in Chinese)

[6] 刘何伟, 钱俊宏, 马秀刚, 等. 稀疏孔径望远系统的装调检测与模拟分析[J]. 激光杂志, 2021, 42(10): 31-36.
LIU H W, QIAN J H, MA X G, *et al*.. Adjustment test and simulation analysis on sparse aperture telescopic system[J]. *Laser Journal*, 2021, 42(10): 31-36. (in Chinese)

[7] TRAUB W A. Combining beams from separated telescopes[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(4): 528-532.

[8] MILLER N J, DIERKING M P, DUNCAN B D. Optical sparse aperture imaging[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(23): 5933-5943.

[9] HE X J, MA H T, LUO CH X. Simulation of co-phase error correction of optical multi-aperture imaging system based on stochastic parallel gradient decent algorithm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9682: 96820V.

[10] 何小君. 基于随机并行优化算法的光学多孔径成像共相误差校正技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2017.
HE X J. Study on Co-phase error correction of optical multi-aperture imaging system based on stochastic parallel gradient decent algorithm[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences), 2017. (in Chinese)

[11] XIE Z H, MA H T, Qi B, *et al*.. Experimental demonstration of enhanced resolution of a Golay3 sparse-aperture telescope[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(4): 041101.

[12] 谢宗良. 相控望远镜阵列成像关键技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2018.
XIE Z L. Study on key technology of phased telescope array imaging[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences), 2018. (in Chinese)

[13] JIANG A M, WANG S, DONG ZH CH, *et al*.. Wide-band white light sparse-aperture Fizeau imaging interferometer testbed for a distributed small-satellites constellation[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(11): 2736-2746.

[14] JIANG A M, DONG ZH CH, XUE J W, *et al*.. Detection and closed-loop control of piston errors for a Fizeau imaging interferometer[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(13): 3892-3900.

[15] GOLAY M J E. Point arrays having compact, nonredundant autocorrelations[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61(2): 272-273.

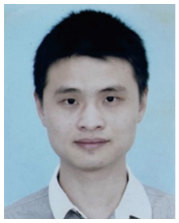
[16] QIAN J H, LIU H W, LIU T, *et al*.. Piston error evaluation and correction for multi-aperture imaging system[J]. *Journal of Physics*:*Conference Series*, 2020, 1775(1): 012006.

[17] MA X F, XIE Z L, MA H T, *et al*.. Piston sensing of sparse aperture systems with a single broadband image via deep learning[J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 16058-16070.

[18] WU Q Y, FAN J L, WU F, *et al*.. Error analysis of the Golay3 optical imaging system[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(13): 2966-2973.

[19] CHEN B, WU Q Y, FAN J L. A Golay3 sparse aperture optical system of primary mirror with free-form surface[J]. *Optical Review*, 2021, 28(1): 113-118.

作者简介：



钱俊宏（1987—），男，四川广安人，博士，工程师，主要从事产品光机电一体化设计与研究。E-mail: 475767903@qq.com

张蓉竹（1975—），女，四川成都人，博士，博士生导师，主要从事精密光学制造与检测研究。E-mail: zhang_rz@scu.edu.cn