



可见光/近红外成像系统共轴折叠反射镜干涉检测技术 (特邀)

熊玉朋 路文文 黄钺 陈付磊 陈善勇

Interferometric test of coaxial folded mirrors for visible/near-infrared imaging systems (*invited*)

Xiong Yupeng, Lu Wenwen, Huang Cheng, Chen Fulei, Chen Shanyong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20230175>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

红外与可见光图像融合的汽车抗晕光系统

Vehicles anti-halation system based on infrared and visible images fusion

红外与激光工程. 2017, 46(8): 818005 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0818005>

基于深度学习的红外与可见光决策级融合检测

Decision-level fusion detection for infrared and visible spectra based on deep learning

红外与激光工程. 2019, 48(6): 626001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0626001>

红外与可见光图像融合技术的研究进展

Research progress of infrared and visible image fusion technology

红外与激光工程. 2021, 50(9): 20200467 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200467>

采用卷积神经网络的红外和可见光图像块匹配

Infrared-visible image patches matching via convolutional neural networks

红外与激光工程. 2021, 50(5): 20200364 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200364>

天宫二号伴星可见光相机成像仿真方法

Imaging simulation method of TG-02 accompanying satellite's visible camera

红外与激光工程. 2017, 46(12): 1218002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.1218002>

可见光全天时遥感相机光学系统设计

Optical system design of remote sensing camera with visible light all-day

红外与激光工程. 2020, 49(1): 0114003 <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0114003>

可见光/近红外成像系统共轴折叠反射镜干涉检测技术(特邀)

熊玉朋^{1,2,3}, 路文文^{1,2,3}, 黄 斌^{1,2,3}, 陈付磊^{1,2,3}, 陈善勇^{1,2,3*}

1. 国防科技大学 智能科学学院 装备综合保障技术重点实验室, 湖南长沙 410073;
2. 国防科技大学 智能科学学院 超精密加工技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073;
3. 国防科技大学 南湖之光实验室, 湖南长沙 410073)

摘要: 由共用镜坯、径向折叠的多个环带反射镜组成的成像系统具有紧凑化、免装调的特点。为确保各反射镜的面形精度和相互位姿精度,提出了计算全息(Computer Generated Hologram, CGH)补偿干涉测量方法。针对可见光/近红外成像需求,基于共轴折叠思路设计了环带四反射镜成像系统;应用金刚石车削工艺加工了多环带共体反射镜;重点针对其中共体的主镜、三镜和次镜、四镜分别设计了CGH补偿器,通过合理选择离焦载频和CGH轴向位置,有效分离了干扰衍射级次的鬼像,实现了多个反射镜面形与相互位姿误差的同步检测。干涉测量结果表明,多个反射镜同时达到接近零条纹状态,面形精度和相互位姿精度较高,且无鬼像干扰。系统对100 m远处目标探测实验表明,反射镜不需要额外装调即可实现良好成像,具有集成度高、研制周期短、成像质量高的优点。

关键词: 可见光/近红外成像系统; 折叠反射镜; 干涉检测; 计算全息; 高次非球面

中图分类号: O439; O436.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230175

0 引言

光电成像系统是各类装备的眼睛,在场景探测和目标识别方面具有不可替代的作用,为获得更丰富的目标信息,多波段融合探测是其发展方向之一。现有多波段成像系统多采用分立式结构,系统体积架构大、制造成本高,且分立系统间存在的视差无法保证空间一致性,这给图像融合等后端处理带来诸多难题。多波段共孔径也是一种常用的构型,一般是利用分光元件对前置光路进行分光后,再通过分立的后置光路响应不同波段的探测需求。多波段共孔径的方案改善了视场和光轴的一致性,可提升可见光成像系统和长波红外成像系统的图像融合能力,但前置光路以外的光学元件数目较多,系统装调难度大,抗外界干扰能力较差。

伴随着以单点金刚石车削为代表的超精密加工技术的发展,将多个复杂曲面光学元件高形位精度同步集成在同一块镜坯上成为可能,这类多面共体元

为光学系统的构型选择、性能优化和系统装调提供了新的解决方案,正受到高度关注。除在离轴三反/四反成像系统中采用多面共体结构以缩小体积并提高稳定性外,同轴系统也可以通过轴向压缩、径向折叠的方式,利用多面共体结构实现扁平化紧凑成像系统设计。系统成像所用的多个反射镜均为环带形式,径向错开而轴向距离很短。由于系统入瞳为环带,中心遮拦部分较大,通常可同轴嵌套多个不同功能的同类系统实现可见光、红外等多个波段的共轴成像,应用于无人平台光电探测^[1-5]、眼视光学^[6]、消费电子产品如手机微光学标签识别^[7]等领域具有明显优势。也可用透镜材料甚至梯度折射率材料^[8]将整个系统集成在单块镜体上,或与液体透镜等构成可变焦的共轴折叠成像系统^[9]。

多面共体反射镜是将两个或多个曲面集成在一个基底上,各曲面间的位置关系依靠加工来保证,不需要后续装调。检测是超精密加工的前提,多面共体反射镜是将复杂曲面的装调难度转移到检测上,因此

收稿日期:2023-03-30; 修订日期:2023-05-31

基金项目:国家自然科学基金(51975578)

作者简介:熊玉朋,男,副教授,博士,主要从事光学系统设计与集成方面的研究。

通讯作者:陈善勇,男,研究员,博士,主要从事光学检测与超精密加工方面的研究。

同时测得多个曲面的面形误差和位姿误差非常关键。传统的组合镜组补偿器不合同时对多个非球面进行零位测试。计算全息 (Computer Generated Hologram, CGH) 补偿方法是在同一个基底上同步制作多个不同功能的衍射区域, 不同衍射区域生成不同面形的测试波前, 能够同时测得多个面形的面形误差及相对位姿误差, 能够为补偿加工提供准确误差反馈, 从而提高多面共体反射镜的加工精度^[10]。CGH 已广泛用于非球面、离轴非球面和自由曲面的高精度补偿检测^[11-14], 但针对共轴折叠多面共体反射镜的 CGH 补偿器设计还有诸多难题需要解决。

面向多波段融合探测需求, 基于共轴折叠思路设计了可见光/近红外融合成像系统, 针对其中的多面共体光学元件进行 CGH 补偿器设计, 重点对干扰衍射级次的鬼像进行分析和抑制, 最后完成形位误差同步检测, 研制的成像系统获得了较好的成像效果。

1 共轴折叠可见光/近红外成像系统

1.1 设计要求与初始结构求解

该成像系统用于可见光/近红外成像, 探测器的响应波段覆盖可见光至 750~1 100 nm 的近红外波段, 像元尺寸为 3.45 μm, 像元数为 2 448×2 048, 角分辨率优于 0.5 mrad, 视场大于 10°。系统采用共轴折叠结构, 在中心遮拦部分同轴嵌套一个可见光成像镜头 (货架产品)。

共轴折叠成像系统参数如图 1 所示。系统入瞳为环形孔径, d_{out} 代表系统外径, d_{in} 代表系统内径, d 代表系统厚度, 光线经 d_{out} 和 d_{in} 之间的宽度为 w 的环形孔进入, 经过多次反射后入射到像面上。遮拦比为 $\alpha = d_{in}/d_{out}$, 有效口径为 $d_{eff} = \sqrt{d_{out}^2 - d_{in}^2}$ 。

光学系统的初始结构可以在常规同轴四反系统

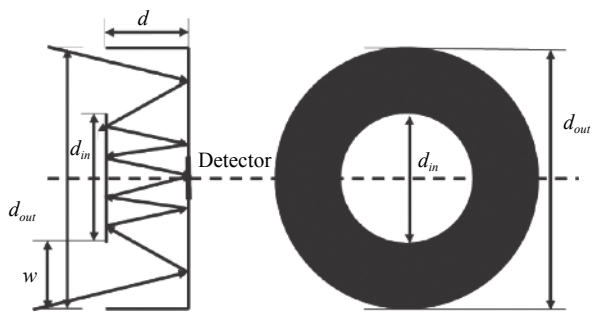


图 1 折叠成像系统简图

Fig.1 Schematic diagram of the folding imaging system

结构的基础上基于像差理论和附加边界约束条件计算得到, 初始结构参数见表 1。

表 1 初始结构参数

Tab.1 Initial structure parameters

Surface	Radius/mm	Distance/mm	Conic
M_1	-43.576	-4.850	-3.272
M_2	229.697	4.700	91.869
M_3	107.812	-4.895	-336.062
M_4	-27.388	-	-18.507

1.2 光学设计结果与评价

将各镜面的面形改为偶次非球面, 非球面方程如公式 (1) 所示:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + A_2r^2 + A_4r^4 + A_6r^6 + A_8r^8 + A_{10}r^{10} + A_{12}r^{12} + A_{14}r^{14} + A_{16}r^{16} \quad (1)$$

式中: c 代表顶点曲率; r 代表径向坐标; k 代表二次常数, 并设置非球面的最高幂次为 16。以点列图大小为评价函数对光学设计结果进行参数优化, 得到如图 2 所示的成像系统, 光线从环形入瞳入射到主镜 S1, 先后经过次镜 S2、三镜 S3 和四镜 S4 反射后成像于探测器上。主镜和三镜、次镜和四镜分别共用镜坯, 系统基本参数如表 2 所示, 优化后的高次非球面系数如表 3 所示。

图 3 为系统的光学调制传递函数曲线, 可以看出全视场内调制函数值接近衍射极限。图 4 为系统的场曲和畸变曲线, 可以看出系统全视场畸变小于 1%。

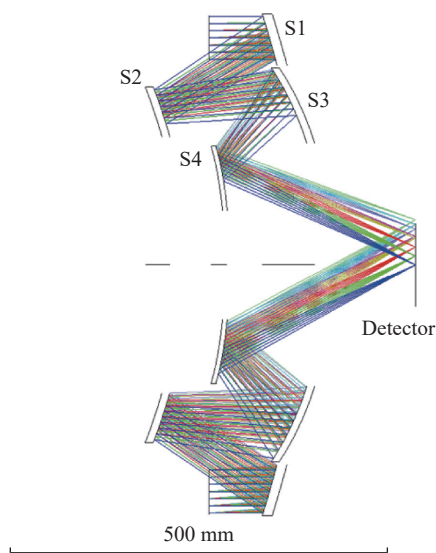


图 2 成像系统光路

Fig.2 Optical layout of the imaging system

表 2 基本面型参数

Tab.2 Basic surface parameters

Surface	M_1	M_2	M_3	M_4
Radius/mm	-67.998	-239.1149	-132.9414	-64.7218
Distance/mm	-15.485	18.15515	-12.74705	24.65042
Diameter/mm	66.2129	52.86353	52.75673	32.0385
Conic coefficient	0.29199	67.76022	2.859459	-25.448

表 3 高次非球面系数

Tab.3 High order aspheric coefficients

Surface	M_1	M_2	M_3	M_4
A_2	0.0015293882	-0.0075416624	0.0056460009	0.0015335974
A_4	-1.0962896e-006	4.375154e-006	-2.6497218e-007	-1.296045e-005
A_6	1.5847328e-010	3.5537337e-009	-1.6551466e-009	7.4891721e-009
A_8	3.3404588e-013	3.7951706e-012	-3.5939478e-013	3.4871654e-011
A_{10}	5.8294423e-016	-5.2626752e-015	1.6072703e-015	-4.9330029e-013
A_{12}	-5.4089482e-019	4.9805961e-018	-3.6151876e-018	2.1115162e-015
A_{14}	2.6248278e-022	-2.5360935e-021	2.9968098e-021	-4.6380052e-018
A_{16}	5.322143e-026	-8.9904043e-025	-1.1493177e-024	4.0505877e-021

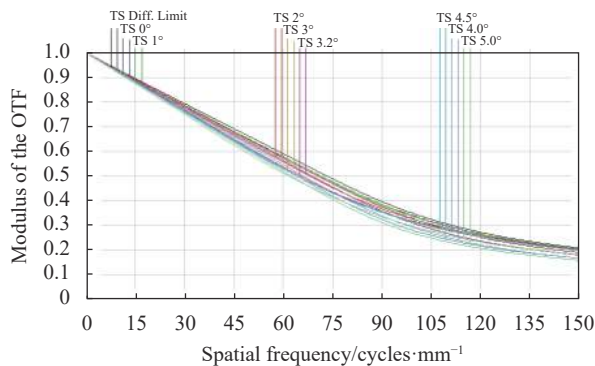


图 3 光学调制传递函数曲线

Fig.3 Modulation transfer function (MTF) curve

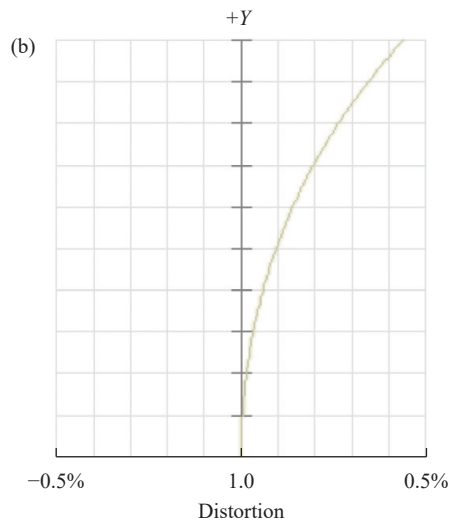
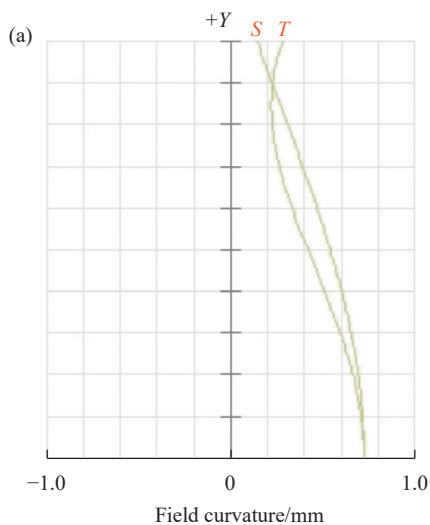


图 4 (a) 场曲与 (b) 畸变曲线

Fig.4 (a) Field curvature and (b) distortion curves



2 共轴折叠反射镜的 CGH 补偿器设计

2.1 主镜与三镜的 CGH 设计

主镜与三镜共用一个镜坯, 面形均为最高 16 次的偶次非曲面 (Even Asphere), 口径均为环形, 其中主镜环带外径 66.6 mm、内径 53 mm; 三镜环带外径 52.2 mm、内径 32.2 mm。设计 CGH 共用干涉仪实现主镜与三镜的同时检测, 使得从干涉仪发出的测试光束中一部分被 CGH 上的主镜测试全息区域衍射后,

调制成与主镜面形匹配的测试波前;另一部分被同一个 CGH 上的三镜测试全息区域衍射后,调制成与三镜面形匹配的测试波前。考虑到主镜与三镜均为回转对称非球面且具有较大中心遮拦孔,CGH 相位函数采用回转对称多项式(如 Zemax 软件中的 Binary 2 类型)且设计离焦 (power) 载频来隔离干扰衍射级次的鬼像。

由于 CGH 调制后的测试光束是法向入射到被测非球面后沿着原路反射回来,满足零位测试 (Null Test) 条件,首先计算被测非球面法向光线如图 5 所示。主镜 (S1) 非球面度峰谷值 (Peak-to-Valley, PV) 约 35.4λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$ 为干涉仪工作波长,下同),最小弥散斑位置到其顶点距离为 $l_1=109.589\text{ mm}$,三镜 (S3) 非球面度 PV 约 162.8λ ,最小弥散斑位置到其顶点距离为 $l_3=49.367\text{ mm}$,主镜与三镜顶点距离由前述成像系统设计给出 $d=2.669875\text{ mm}$ 。在设计 CGH 时必须确保主镜与三镜处于正确的相对位置。

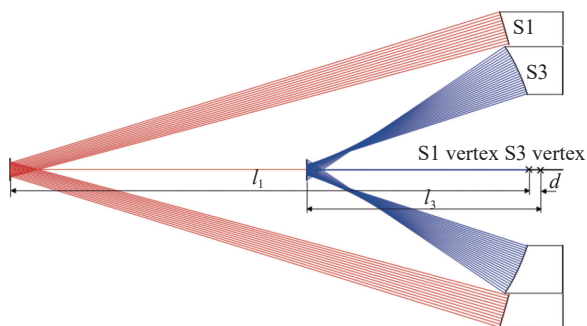


图 5 计算被测面的法向光线确定 CGH 位置

Fig.5 Calculation of normal rays reflected off the test surface to determine the CGH position

由于被测面口径不大,确定 CGH 位置时一方面考虑“萌芽时就消灭它”的消像差原则,应将 CGH 尽可能靠近被测面(预留安全距离方便检测装调);另一方面,像点应取主镜与三镜最小弥散斑位置的中间位置,这相当于在两个测试全息的相位函数中加入了不同的离焦载频,可以方便地隔离干扰级次。此外,因为像点就是干涉仪的标准球面镜头 (Transmission Sphere, TS) 的焦点,像点位置决定了球面测试波前的 f 数,应与干涉仪 TS 的 f 数匹配。

CGH 采用光掩模制作工艺进行加工,使用标准的 6025 铬板 6 in (1 in=2.54 cm) 熔石英平板、厚约 6.4 mm)。CGH 到三镜顶点距离 18 mm,到主镜顶点距离

15.330 125 mm,到像点距离 45 mm,优化 CGH 的相位函数使得波像差均方根 (Root-Mean-Squares, RMS) 值最小。主镜和三镜 CGH 相位函数的多项式分别取 6 和 12 项,优化后的波像差残差 RMS 值均为零。如图 6 所示,主镜与三镜共用 CGH 及干涉仪点光源,主镜测试全息区域为 $\phi 44.4\text{--}58.4\text{ mm}$ 环带,三镜测试全息区域为 $\phi 19.2\text{--}32.8\text{ mm}$ 环带。同时,在 CGH 中心 $\phi 19\text{ mm}$ 区域设计辅助对准全息,用于对转 CGH 与干涉仪点光源。CGH 上三个全息区域均采用 Binary 2 类型的回转对称图样,其中主镜测试全息的最小条纹周期为 $2.5\text{ }\mu\text{m}$,三镜测试全息的最小条纹周期为 $2.9\text{ }\mu\text{m}$,均采用 +1 级衍射,对于占空比为 0.5 的二元台阶振幅型 CGH,其衍射效率约 10%,适用于金属反射镜等高反射率面形检测。辅助对准全息可采用 +3 级衍射,最小条纹周期为 $4.6\text{ }\mu\text{m}$,衍射效率约 1%,与干涉仪 TS 参考面 4% 反射率也能很好地匹配,获得较好的干涉条纹对比度。

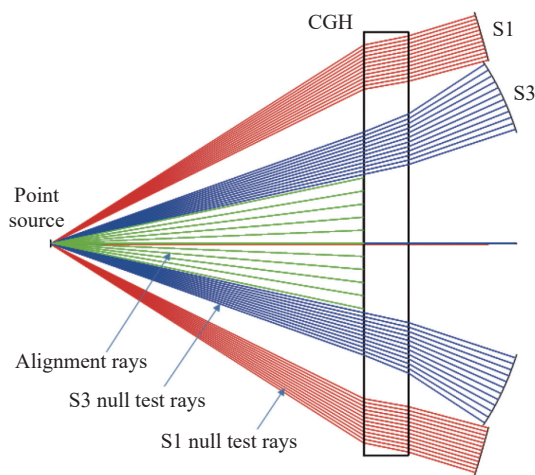


图 6 主镜与三镜的 CGH 设计

Fig.6 CGH design for the primary mirror and the tertiary mirror

CGH 设计必须检查有无其他衍射级次的鬼像干扰,利用光学设计软件的光线追迹功能,如 Zemax 中通过 Multi-Configuration 设置不同衍射级次的组合(光线往返),在适当直径的像平面针孔滤波下,查看干扰级次的光线是否被有效遮拦而不能到达像平面。针孔直径所对应的空间频率通常应大于干涉仪 CCD 像素间隔所确定的 Nyquist 采样频率,即尽量避免因隔离干扰级次而设置的针孔滤波降低测量系统的空间分辨率。根据 CGH 设计结果,假设干涉仪

CCD 像素为 1000 pixel×1000 pixel, 主镜与三镜检测的针孔直径分别取 0.6 mm 与 1 mm, 经检查确认各级衍射级次没有鬼像干扰。值得一提的是, 三镜 CGH 较易出现 (+3, 0)、(0, +3) 级次组合的鬼像干扰, 如果将 CGH 到像点距离改为 43 mm, CGH 到三镜顶点距离改为 20 mm, 则存在如图 7 所示 (+3, 0) 级次组合的鬼像。此时即使调整 CGH 到像点距离 (改变离焦载频) 也不能改善, 而将 CGH 到三镜顶点距离改为 18 mm 则可以避免鬼像干扰, 如图 8 所示, 三镜反射回来的光线可被直径 1 mm 的针孔完全遮挡, 不会进

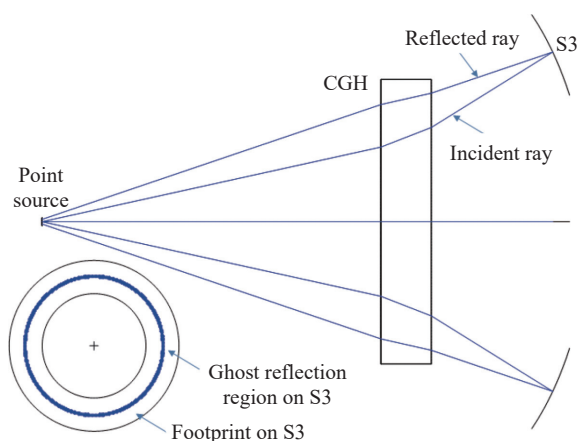


图 7 当 CGH 到像点距离 43 mm、到三镜顶点距离 20 mm 时由 (+3, 0) 级次组合形成的环带鬼像干扰

Fig.7 Annular ghost fringes generated by (+3, 0) orders when the distances of CGH to the point source and the tertiary mirror are 43 mm and 20 mm, respectively

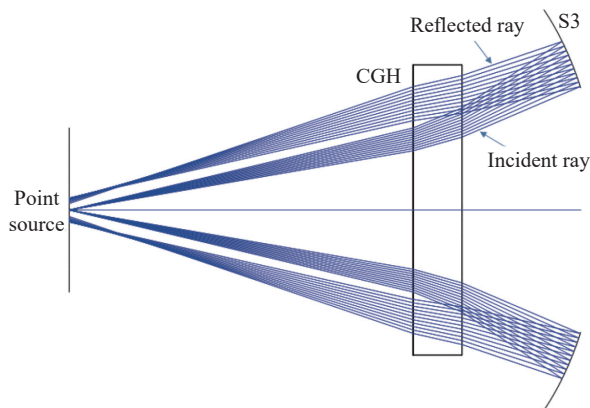


图 8 当 CGH 到像点距离 45 mm、到三镜顶点距离 18 mm 时可避免鬼像干扰

Fig.8 Ghost fringes are eliminated when the distances of CGH to the point source and the tertiary mirror are 45 mm and 18 mm, respectively

入探测器像面。

对于回转对称全息图样, 还应检查 CGH 测试全息反射的鬼像干扰, 因为测试球面波前可能与 CGH 反射非球面波前在某个环带处匹配 (接近等光程), 从而形成环带鬼像。经检查确认, 主镜和三镜的 CGH 测试全息反射不会形成鬼像干扰。

2.2 次镜与四镜的 CGH 设计

次镜与四镜共用一个镜坯, 面形均为最高 16 次的偶次非曲面, 口径均为环形, 其中次镜环带外径 47.2 mm、内径 34 mm; 四镜环带外径 31.6 mm、内径 14.4 mm。与主镜和三镜类似, CGH 相位函数采用回转对称多项式且设计离焦载频来隔离干扰衍射级次的鬼像。不同的是, 次镜与四镜都是凸非球面, 检测时置于干涉仪 TS 参考面与焦点之间, 需与 TS 的 f 数及参考面曲率半径匹配。因为需要加入离焦载频, 测试球面波的 f 数不应与被测非球面最佳拟合球面的 R 数 (曲率半径与口径之比) 接近, 这里选用 $f/3.3$ 左右的 TS, CGH 到次镜顶点距离 20 mm, 到四镜顶点距离 14.591901 mm。次镜和四镜 CGH 相位函数的多项式均取 6 项, 优化后的波像差残差 RMS 值约 0.0005λ 。若选用 4 in TS, 如图 9 所示, 次镜与四镜共用 CGH 及干涉仪点光源, 点光源即 TS 焦点 (图中未显示) 到参考面距离 298.03 mm。为确保 TS 参考面有效口径够大, 参考面到 CGH 的距离应不小于 60 mm。

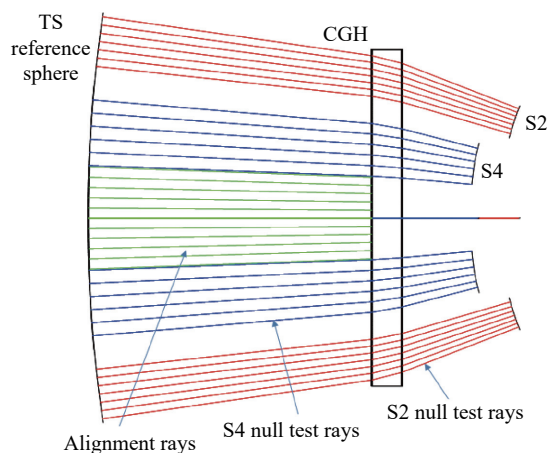


图 9 使用 4 in $f/3.3$ TS 时次镜与四镜的 CGH 设计

Fig.9 CGH design for the secondary mirror and the fourth mirror with a 4-inch $f/3.3$ TS

设置次镜与四镜检测时的像面针孔直径为 1.1 mm 与 1.7 mm, 经检查确认各级衍射没有鬼像干

扰,但四镜测试全息存在自身反射鬼像。图 10 所示为 CGH 上-1 级衍射(反射)形成的环带鬼像区域,会与非球面测试时的干涉图混叠在一起形成干扰。

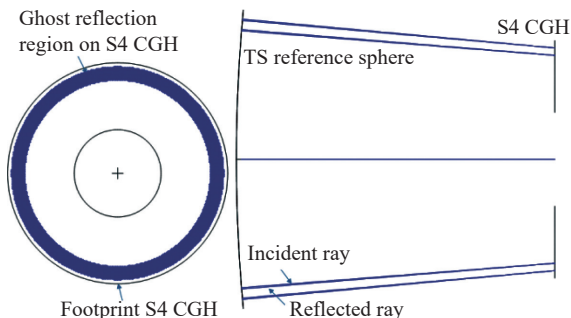


图 10 使用 4 in $f/3.3$ TS 时四镜 CGH 反射(-1 级)鬼像

Fig.10 Ghost reflection of the fourth mirror CGH (-1 order) with a 4-inch $f/3.3$ TS

为了消除鬼像干扰,改用 6 in $f/3.5$ TS, TS 焦点到参考面距离 475.8 mm,调整 TS 参考面到 CGH 距离为 150 mm,如图 11 所示。设置次镜与四镜检测时的像面孔直径为 1.5 mm 与 2.3 mm,检查各级衍射及 CGH 自身反射均无鬼像,满足共轴折叠的多面共体反射镜的高精度检测要求。

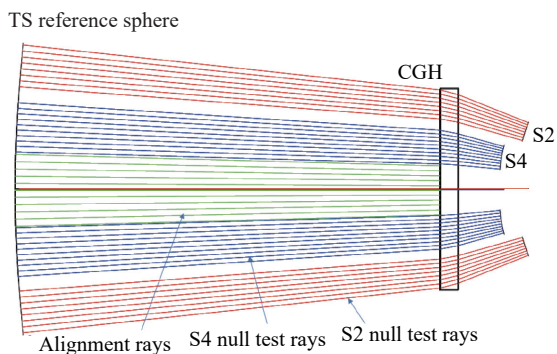


图 11 使用 6 in $f/3.5$ TS 时次镜与四镜的 CGH 设计

Fig.11 CGH design for the secondary mirror and the fourth mirror with a 6-inch $f/3.5$ TS

次镜测试全息区域为 $\phi 48.8\sim 71.2$ mm 环带,四镜测试全息区域为 $\phi 17.6\sim 44.6$ mm 环带。同时,在 CGH 中心 $\phi 17.4$ mm 区域设计辅助对准全息,用于对转 CGH 与干涉仪点光源。CGH 上三个全息区域均采用 Binary 2 类型的回转对称图样,其中次镜测试全息的最小条纹周期为 $2.3\ \mu\text{m}$,四镜测试全息的最小条纹周期为 $2.8\ \mu\text{m}$,辅助对准全息的最小条纹周期为

$11.9\ \mu\text{m}$,均采用+1 级衍射。

3 实验验证

采用金刚石车削工艺进行光学元件加工,主镜和三镜共用镜坯,在同一工序中完成加工,如图 12 所示。加工后利用单个 CGH 同时对两个镜面进行零位补偿测量,如图 13 所示。测得面形误差如图 14 所示,主镜和三镜看作一个整体的面形误差为 PV 0.87λ 、RMS 0.12λ 。从干涉图中可以看出,鬼像条纹只存在于主镜与三镜条纹区域之外,不形成干扰。主镜和三镜同时达到接近零条纹状态,说明两者的面形精度和相互位姿精度较高(达到亚波长级),满足系统成像要求。由于各个全息区域采用同样的工艺同步制作(例如光掩模制造工艺),其衍射图样的位置误差通常为 $0.1\ \mu\text{m}$ 级,此例中测试全息的刻线周期最小为 $2.5\ \mu\text{m}$,不同衍射波前之间的误差小于 PV $\lambda/25$,确保了共体的多个反射镜之间的相互位姿精度。采用

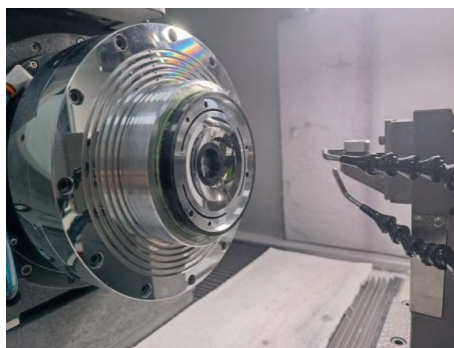


图 12 利用金刚石车削工艺加工共体的主镜和三镜

Fig.12 Diamond turning of the monolithic primary mirror and tertiary mirror

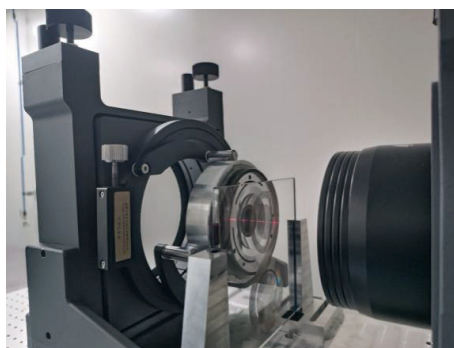


图 13 共体主镜和三镜的 CGH 补偿干涉测量

Fig.13 CGH null test of the monolithic primary mirror and tertiary mirror

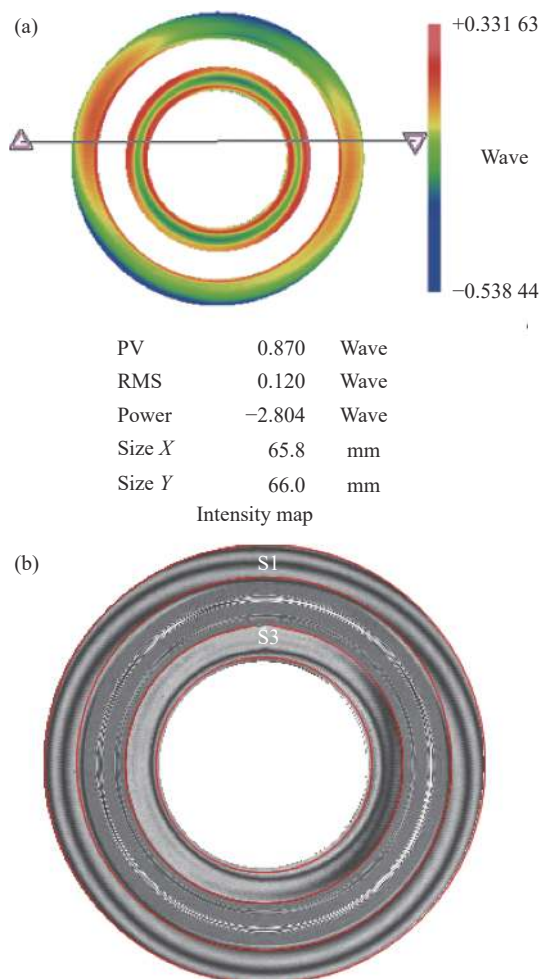


图 14 主镜和三镜的面形误差和零条纹干涉图

Fig.14 Surface error and null fringe interferogram of the primary mirror and tertiary mirror

基于 CGH 补偿的波前干涉方法能够直观检验共体反射镜由于相互位姿误差导致的波像差。而常规的基于位移传感测头扫描测量的方法则需要分别探测两个反射镜面,通过复杂的数据处理(如面形拟合)确定其光轴位置,计算其相互位姿误差,进而评估其对系统成像的波像差影响。受测头误差和扫描运动误差的影响,这种方法的测量精度通常要比波前干涉方法低 3~5 倍。次镜与四镜的加工、检测方法相同,同样利用 CGH 补偿获得零条纹状态。将主镜、三镜的镜体与次镜、四镜的镜体装配在一起,几乎不需要额外装调即可实现良好成像。系统装配好后,利用平行光管搭设性能测试光路,测得系统视场为 12°,有效焦距为 70 mm,角分辨率约为 0.052 mrad,均满足设计要求。图 15 为利用该系统对距离 100 m 左右的目标成像所采集的图像,可清晰地看到瓷砖缝隙和护栏等窄

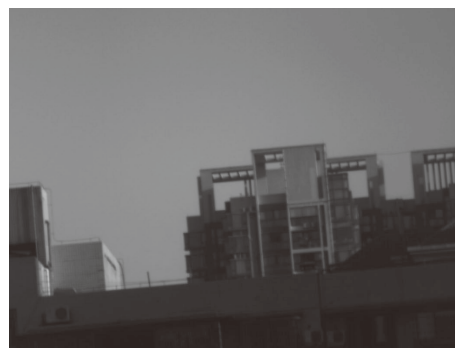


图 15 对距离约 100 m 的目标成像

Fig.15 Imaging of targets at distance of about 100 m

细特征。

4 结 论

文中针对同轴四反成像系统的共体折叠反射镜提出了基于 CGH 的补偿干涉测量方法。该方法通过在一个 CGH 基底上制作多个不同功能的全息区域,使入射测试波前衍射后生成不同形状的非球面波前,可同时对不同反射镜面形进行零位测试。基于 CGH 补偿测量进行超精密加工后的反射镜面精度和位姿精度都达到亚波长级,直接装配在一起而无需额外装调即可实现良好成像。同样,通过加工定位基准,同轴嵌套多个类似系统,能方便实现可见光到红外的多个波段共轴成像,对于无人平台目标探测及快速图像融合处理具有明显的优势。

参考文献:

- [1] Tremblay E J, Stack R A, Morrison R L, et al. Ultrathin four-reflection imager [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(2): 343-354.
- [2] Tremblay E J, Stack R A, Morrison R L, et al. Ultrathin cameras using annular folded optics [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(4): 463-472.
- [3] Zhang Ruirui, Shen Weimin. Ultrathin lenses using annular folded optics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1306-1310. (in Chinese)
- [4] Xiong Yupeng, Dai Yifan, Tie Guipeng, et al. Engineering a coaxial visible/infrared imaging system based on monolithic multisurface optics [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(34): 10036-10043.
- [5] Xiong Yupeng, Dai Yifan, Chen Shanyong, et al. Design and experimental demonstration of coaxially folded all-reflective

- imaging system [J]. *Current Optics and Photonics*, 2019, 3(3): 227-235.
- [6] Tremblay E J, Stamenov I, Bee R D, et al. Switchable telescopic contact lens [J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 19580-19586.
- [7] Ge Lan, Liang Zhongcheng. Micro-optics label receiving system based on annular aperture ultra-thin lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1222001. (in Chinese)
- [8] Lippman D H, Chou R, Desai A X, et al. Polychromatic annular folded lenses using freeform gradient-index optics [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(3): A1-A9.
- [9] Li Lei, Wang Di, Liu Chao, et al. Ultrathin zoom telescopic objective [J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18674-18685.
- [10] Xiong Yupeng, Luo Tiancong, Dai Yifan, et al. In situ measurement and error compensation of monolithic multisurface optics [J]. *Optics Communications*, 2021, 484: 126665.
- [11] Chen Shanyong, Xue Shuai, Zhai Dede, et al. Measurement of freeform optical surfaces: Trade-off between accuracy and dynamic range [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(5): 1900365.
- [12] Guo Chengli, Zheng Dekang, Zhu Deyan, et al. Testing of aspheric surface with low reflectivity using hybrid type computer-generated hologram (*invited*) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 20220547. (in Chinese)
- [13] Zhang Yuxin, Li Fazhi, Yan Lisong, et al. Long focal length aspherical mirror testing with CGH and auxiliary lenses (*invited*) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 20220384. (in Chinese)
- [14] Su Hang, Wang Xiaokun, Cheng Qiang, et al. Sub-aperture stitching and CGH mixed compensation for the testing of large convex asphere (*invited*) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 20220576. (in Chinese)

Interferometric test of coaxial folded mirrors for visible/near-infrared imaging systems (*invited*)

Xiong Yupeng^{1,2,3}, Lu Wenwen^{1,2,3}, Huang Cheng^{1,2,3}, Chen Fulei^{1,2,3}, Chen Shanyong^{1,2,3*}

(1. Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Hunan Key Laboratory of Ultra-Precision Machining Technology, College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract:

Objective Photoelectric imaging system serves as the “eye” of all kinds of equipment, which plays an indispensable role in scene detection and target recognition. To acquire more abundant target information, one of the development directions is multi-band fusion detection. However, the existing multi-band imaging system mostly adopts the discrete structure, with large system volume architecture, high manufacturing cost, and lack of spatial consistency due to parallax between the discrete systems. The challenges pose difficulties in image fusion and other back-end processing. Multi-band common aperture, also a common configuration, is generally used to split the front optical path with optical components, and subsequently respond to the detection requirements of different bands through the discrete rear optical path. To address these issues, coaxial folded mirrors for visible/near-infrared imaging systems are designed in this paper.

Methods To guarantee the surface accuracy and relative orientation accuracy for multiple mirrors, an interferometric null test with a computer-generated hologram (CGH) is proposed (Fig.5). Diamond turning technology is applied to machining the mirrors. In this approach, two CGHs are designed for the null test of the monolithic primary/tertiary mirrors and the monolithic secondary/fourth mirrors (Fig.6, Fig.9). Ghost image of

disturbance orders of diffraction is effectively separated by properly choosing the power carrier and the axial position of the CGH. A single CGH is capable of simultaneously measuring both the surface error and the relative orientation error of multiple mirrors (Fig.8). The result of the interferometric null test shows multiple mirrors are measured with nearly null fringes, indicating high accuracy in terms of surface form and orientation. Moreover, no ghost disturbance is observed.

Results and Discussions The optical components undergo the diamond turning process, and the mirror blank is shared among the primary mirror and the three additional mirrors, allowing for simultaneous processing (Fig.12). After processing, a CGH is used to conduct zero compensation measurements on both mirrors (Fig.13). The measured surface shape error is shown (Fig.14), and the primary mirror and the three mirrors demonstrate a combined surface shaper error of PV 0.87λ , RMS 0.12λ ; Interference diagram reveals that the ghost image stripes only exist outside the main mirror and the three mirror stripes, and they do not form interference. The primary mirror and the three mirrors reach a near-zero fringe state at the same time, indicating a high level of surface shape accuracy and mutual pose accuracy (reaching the sub-wavelength level), which meets the imaging requirements of the system.

Conclusions The study proposes an interferometric null test with a CGH for the coaxial folded mirrors in visible/near-infrared imaging systems. The method involves the creation of multiple holographic regions with different functions on the same CGH substrate, which allows for the generation of the aspheric wavefronts of different shapes after the diffraction of the incident test wavefront. Consequently, the zero position of different mirror shapes can be tested at the same time. Following ultra-precision machining based on CGH compensation measurement, the mirror shape accuracy and pose accuracy attain a sub-wavelength level, which realizes direct assembly without additional assembly and adjustment for optimal imaging performance. Similarly, by positioning reference processing, multiple similar systems are nested coaxially, which enables multi-band coaxial imaging from visible light to near-infrared. Such capability holds obvious advantages for unmanned platform target detection and fast image fusion processing.

Key words: visible/near-infrared imaging system; folded mirror; interferometry; CGH; high-order aspheric surface

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (51975578)