

基于可见光波段的编码优化消色差衍射透镜设计分析

赵玺竣^{1,2}, 范斌^{1*}, 何一苇¹, 张豪^{1,2}, 郑书培^{1,2}, 钟烁^{1,2}, 雷嘉明^{1,2}, 杨伟³, 杨虎¹

¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

²中国科学院大学, 北京 100039;

³成都中科卓尔精密仪器有限公司, 四川 成都 610299

摘要 传统衍射光学元件(DOE)在宽波段工作时存在的严重色散限制了它在宽波段成像中的应用。提出一种基于编码优化的消色差衍射透镜设计,对整个衍射透镜的微结构高度进行编码后,利用粒子群优化算法进行优化,以平衡各个波长在特定焦距下的聚焦作用,使各波长的点扩展函数(PSF)变得几乎相同,实现400~700 nm连续可见光波段中消色差的目的。对传统DOE、分区方式消色差DOE和所提出的编码优化消色差DOE进行仿真验证和成像测试。结果表明,相较于其他两种DOE,编码优化DOE在各波长下的PSF更一致,可见光下截止频率提高至8.6 lp/mm。相较于传统DOE和分区消色差DOE,所提出的编码优化DOE在可见光下具有更好的消色差能力和更高的分辨率。

关键词 衍射; 衍射透镜; 消色差; 点扩展函数; 粒子群优化

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1305001

Design and Analysis of Coding Optimized Achromatic Diffraction Lens Based on Visible Band

Zhao Xijun^{1,2}, Fan Bin^{1*}, He Yiwei¹, Zhang Hao^{1,2}, Zheng Shupe^{1,2}, Zhong Shuo^{1,2},
Lei Jiaming^{1,2}, Yang Wei³, Yang Hu¹

¹Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

³Zhongkezhaoer Precision Instrument Co., Ltd., Chengdu 610299, Sichuan, China

Abstract The serious chromatic dispersion of traditional diffractive optical elements (DOEs) limits their application in wide-band imaging. In this paper, a design of achromatic diffractive lens is proposed. After coding the microstructure height on the whole diffractive lens, the microstructure height is optimized by the particle swarm optimization algorithm to balance the focusing effect of each wavelength in the visible spectrum at a specific focal length, so that the point spread function (PSF) of each wavelength in the visible spectrum becomes almost the same, achieving the goal of achromatism in the continuous visible light band from 400 nm to 700 nm. The simulation and imaging test of traditional DOE, zone achromatic DOE, and coding optimized achromatic DOE proposed in this paper are carried out. Compared with the other two DOEs, the PSF of coding optimized DOE at each wavelength is more consistent, and the cut-off frequency under visible light is increased to 8.6 lp/mm. Therefore, compared with traditional DOE and zone achromatic DOE, the coding optimized DOE proposed in this paper has better achromatic ability and higher resolution in visible light.

Key words diffraction; diffraction lens; achromatism; point spread function; particle swarm optimization

1 引言

衍射光学元件以其轻薄的物理结构、大而灵活的

设计空间和宽松的面型公差,现已在成像系统中得到越来越多的应用。传统衍射光学元件(DOE)的点扩展函数(PSF)受波长影响严重,成像时非设计波段会

收稿日期: 2021-11-30; 修回日期: 2021-12-20; 录用日期: 2022-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(62075220)

通信作者: *fanbin@ioe.ac.cn

出现大直径模糊,给图像带来明显的色晕,有时即便在单个色彩通道上也会出现色散模糊^[1-2],因此传统 DOE 的应用常局限于窄波段成像系统。

为提高 DOE 在可见光下成像的实用性,国内外很多单位开展了 DOE 的消色差研究。2010 年美国国防高级计划研究局提出薄膜光学成像实时开发计划(MOIRE),该项目利用 10 m 口径衍射主镜和 Schupmann 消色差结构实现 580~620 nm 波段的消色差成像^[3]。但 Schupmann 结构复杂,需要引入后视镜组校正其他像差,并且 Schupmann 系统的公差要求严、带宽窄、视场小,MOIRE 项目中视场仅为 0.016°。2015 年 Nikonov 等^[4]使用单片菲涅耳透镜进行成像,通过跨色彩通道先验的算法来校正色差,从而把消色差的工作转移到算法上。由于 DOE 的强色散,即便在理想色彩通道上也会产生色散模糊,因此由反卷积带来的处理噪声无法避免。文献[5]使用折衍混合透镜,以折射透镜正色差补偿 DOE 巨大的负色差,再利用后端算法校正残余像差。谐衍射透镜具有折射与衍射的混合特性,它的微结构高度是传统 DOE 的 m (m 为正整数)倍,并且 m 越大,其折射就越强,相对于普通 DOE 其像差更小,但依然无法弥补衍射带来的大色差,需要后端算法校正^[6]或加入后视镜组进行色差补偿^[7]。多层衍射元件通过不同材料、不同微结构高度的谐衍射元件对贴组合,将不同波长所对应的衍射级次进行调整聚拢,再结合其他镜组校正残余像差,从而实现可见光波段的消色差成像^[8-9]。文献[10]利用分区思想,将不同设计波长的衍射微结构进行分区组合,实现多个波长下的清晰成像,但在宽波段成像时依然会出现色差模糊。以上方法大多通过增加其他镜组或引入虚拟光学组件来校正 DOE 的大色差,使得 DOE 在宽光谱的应用受到视场、结构等诸多限制。即便运用图像复原算法,系统在后端校正色差时也面临计算复杂度、内存、实时性等挑战。因此,探究一种 DOE 设计方法以从本质上改善 DOE 的强色散特性是有必要的。

基于此,本文提出一种在可见光下实现宽波段消色差的衍射透镜设计,对 400~700 nm 的可见光波段进行密集离散采样,通过对 DOE 的表面微结构高度进行编码优化,在特定焦距下平衡其对不同波长的聚焦作用,使其在 400~700 nm 连续可见光光谱下的 PSF 变得几乎相同。对所设计的编码优化消色差 DOE 进行了仿真分析,并在 8 mm 口径下进行实际加工和成像测试,实验结果表明,本文方法能达到预期的消色差效果,具有可行性和实用性。

2 基本原理

傅里叶光学中,一个非相干的成像过程被建模为理想像与系统 PSF 的卷积过程^[11]。因此,在衍射光学系统中,像面的实际光强为

$$I_i(x_i, y_i; \lambda) = a \iint I_g(x_o, y_o; \lambda) h(x_i - x_o, y_i - y_o; \lambda) dx_o dy_o, \quad (1)$$

式中: a 是实常数; I_g 是几何光学理想像的强度分布; (x_o, y_o) 和 (x_i, y_i) 分别为物面和像面坐标; h 是系统的光强脉冲响应(或 PSF),它是点物产生的衍射斑的强度分布,可进一步写为

$$h(x_i, y_i; \lambda) = |g(x_i, y_i; \lambda)|^2, \quad (2)$$

式中: g 是系统 PSF 的复振幅分布。

根据标量衍射理论^[12],在傍轴近似的条件下,系统的脉冲响应的复振幅分布可近似为

$$g(x_i, y_i; \lambda) = \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkz) \exp\left[j\frac{k}{2z}(x_i^2 + y_i^2)\right] \times \iint U(x_o, y_o; \lambda) \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda z}(x_i x_o + y_i y_o)\right] dx_o dy_o, \quad (3)$$

式中: z 为衍射元件到像平面的距离; k 为波数; $U(x_o, y_o; \lambda)$ 为系统脉冲输入下在物方衍射面处的复振幅分布,它通常可写为

$$U(x_o, y_o; \lambda) = P(x_o, y_o) \exp[j\varphi(x_o, y_o; \lambda)], \quad (4)$$

式中: $P(x_o, y_o)$ 为衍射孔的孔径函数; $\varphi(x_o, y_o; \lambda)$ 为衍射平面上由光学元件带来的各点的相位延迟。在只考虑衍射复振幅的相对分布时,常数因子 $\frac{1}{j\lambda z} \exp(jkz)$

可忽略不计,二次相位因子 $\exp\left[j\frac{k}{2z}(x_i^2 + y_i^2)\right]$ 也会在求衍射强度分布时自动消去。在本文中,相位函数 $\varphi(x_o, y_o; \lambda)$ 将作为该衍射元件的优化目标,实现需要的相位调制效果。于是,有

$$b_c(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} \int_{\Lambda} Q_c(\lambda) I_g(\xi, \eta; \lambda) \times h(x - \xi, y - \eta; \lambda) d\lambda d\xi d\eta, \quad (5)$$

式中: $b_c(x, y)$ 为传感器通道 c 上接收的图像; $Q_c(\lambda)$ 为传感器通道 c 的光谱响应权重; Λ 为传感器通道 c 的光谱范围; (ξ, η) 为物面坐标。

对于具有强烈色散特性的传统衍射元件来说,其 PSF 对波长表现出高度依赖性,即使在单个颜色通道内,不同波长处的 PSF 也具有较大差异。由于这种依赖性,在式(5)的积分过程中,PSF 很难与波长分离,而现行的基于去卷积模型的图像复原算法常忽略这点,将某一波段或某通道的模糊核近似为一个固定的 PSF。对于大色差的衍射系统而言,这一近似会使得复原图像高频信息丢失,引起彩边现象,并且不可避免地丢失色彩保真度。

为了避免 PSF 近似所带来的负面效果,本文在消色差微结构衍射元件的设计中,允许残余像差存在,同时对整个光谱上的波长进行密集采样,对所有采样波长的光线进行相位调制。由于自然光谱 PSF 存在连续性,只需控制各采样波长上 PSF 的一致性,便可在整个可见光谱上实现均匀统一的 PSF。这一方法不仅可以在整个可见光谱范围实现消色差,并且可以使近似 $h(x, y; \lambda) \approx h_c(x, y)$ 重新有效,以更好地促进基于去卷积模型的图像复原算法。此时,有

$$b_c(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_c(x - \xi, y - \eta) \int_{\delta} Q_c(\lambda) I_g(\xi, \eta; \lambda) d\lambda d\xi d\eta = h_c(x, y) \otimes I_c(\xi, \eta), \quad (6)$$

式中: $I_c(\xi, \eta) = \int_{\delta} Q_c(\lambda) I_g(\xi, \eta; \lambda) d\lambda$, 代表通道 c 内的理想彩色图像。因此, 只要能设计出光谱上恒定不变 PSF 消色差衍射透镜, 卷积成像模型就会再次成立。

3 设计方法

3.1 优化参数及初始化结构

根据式(3)、(4), 衍射透镜的光谱 PSF 是由其相位分布函数所决定的, 并且其相位分布可通过调控其表面微结构高度 $\delta(u, v)$ 来进行相位调制:

$$\varphi(u, v; \lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_s - 1) \delta(u, v), \quad (7)$$

式中: n_s 为基底材料的折射率。为得到光谱一致的 PSF, 本文构造一个目标 PSF, 考虑到 ℓ_1 范数具有产生稀疏模型的能力、对离群值更鲁棒且可以大大提升计算速度, 因此使用 ℓ_1 范数来拟合目标 PSF。成本函数构造如下:

$$\delta_{opt} = \arg \min_{\delta} \sum_{\lambda_i \in A} w_i \|p_i(\delta) - t\|_1, \quad (8)$$

式中: w_i 为第 i 个优化波长的成本函数的自适应权重, 它的目的在于平衡各个波长之间的相对衍射效率。在优化过程中, 某一波长 w_i 的值也会根据其 PSF 与目标 PSF 的拟合误差来进行动态调整。具体来说, 如果某一波长在当前微结构高度轮廓设计下具有较低的光功率, 那么这将会通过较大的拟合误差反映出来, 该波长成本函数中的权重在下一迭代中将按式(8)中的规则所修改。如果设计接近最优, 那么所有的 w_i 应该趋于相同。

$$w_i^{k+1} = \frac{\|p_i - t\|_1}{\sum_i \|p_i - t\|_1}, \quad (9)$$

式中: p_i 为各波长优化过程中的强度 PSF, 由式(2)、(3)计算得出; t 为目标 PSF。由于模型只考虑无限远

物点成像, 因此整个模型是旋转对称的, 该优化问题可简化为一维参数问题。

在优化过程中, 为得到与波长无关的几乎一致的 PSF, 必然要牺牲中心波长的锐利程度, 同时提高边缘波长的分辨率, 即将中心波长的 PSF 进行展宽, 边缘波长的 PSF 变窄变高, 因此最终的目标 PSF 不再锐利并且会引入较长的尾部, 这样的 PSF 形状很难用单个高斯模型来拟合。为了寻找一个与当前微结构轮廓相适应的目标 PSF 分布, 本文将动态地调整该目标 PSF, 具体做法为: 经过若干次迭代之后, 将所有波长的 PSF 分布进行平均, 并使用 3 个不同参数的高斯模型来拟合该平均 PSF:

$$t = \sum_{j=1,2,3} a_j G(\mu, \sigma_j), \quad (10)$$

式中: $G(\mu, \sigma_j)$ 为均值为 μ 、方差为 σ_j 的高斯函数; a_j 为各个高斯函数的权重, $\sum_{j=1,2,3} a_j = 1$ 。在每次拟合完成后

对该拟合模型的系数与参数进行调整, 以产生新的更加锐利的目标 PSF。对衍射透镜物理结构进行初始化后, 每次拟合平均 PSF 的过程就是平衡各波长 PSF 的过程。

传统菲涅耳衍射透镜本质上是对折射透镜进行 2π 倍相位压缩的结果, 因此越到孔径边缘, 其周期环带越窄, 微结构分布越密集, 需要操作的参数也就越多。显然, 直接将菲涅耳衍射透镜的物理结构作为初始结构得到的结果不佳, 对本文的优化不利, 因此本文考虑设计一种更接近最优解的初始结构, 如图 1 所示。当对 N 个离散波长进行优化时, 将衍射透镜分为 N 个等面积的同心圆环区域, 每个同心圆环区域都对应一个特定波长 λ_i , 则区域 i 的初始微结构高度都和以 λ_i 作为设计波长、具有相同焦距的菲涅耳透镜在对应的同心圆环区域处的微结构高度相同。这种初始结构不仅平衡了各个波长的光功率, 还在菲涅耳透镜基础上平衡了光在各个波长处的聚焦效率, 对后续优化十分有利。

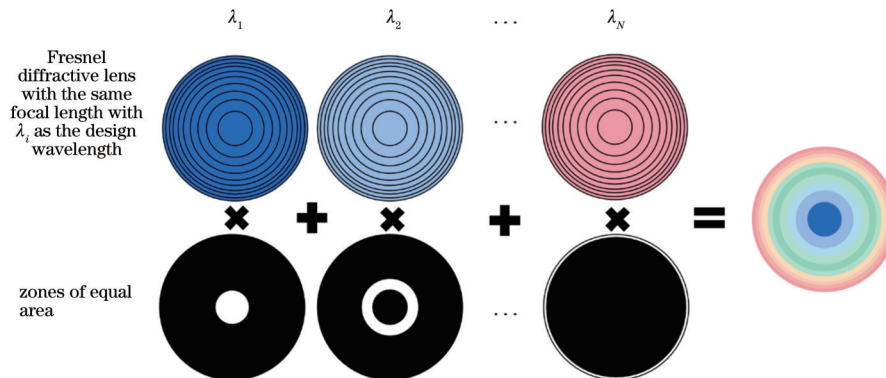


图 1 等面积分区的初始结构

Fig. 1 Initial structure of equal area partition

3.2 随机优化算法及优化模型

本文选择粒子群优化(PSO)算法^[13]来解决优化问题。选择 PSO 算法的主要原因在于:相较于其他随机优化算法,PSO 模型相对简单并且具有不错的全局寻

优能力,在对本文中上千参数优化中的收敛速度较快;在 PSO 算法中,每一代的粒子之间相互独立,每代粒子可以进行并行运算,这大大缩短了计算时间。该优化算法的基本流程如图 2 所示。

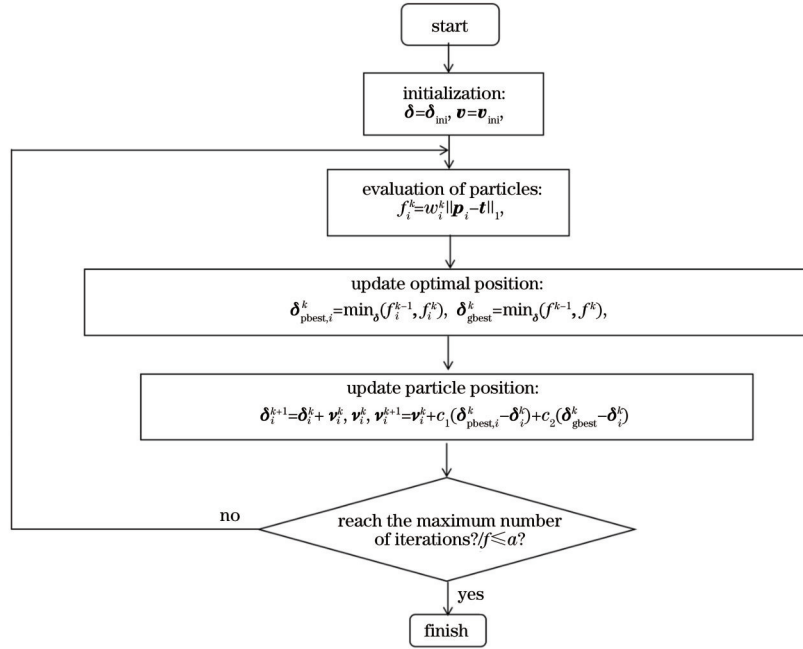


图 2 消色差衍射透镜的 PSO 优化模型

Fig. 2 PSO optimization model of achromatic diffractive lens

图 2 中: c_1 和 c_2 是分布在 $[0, 1]$ 之间的随机权重,影响着优化模型的收敛速度和全局寻优能力; δ 为粒子的位置矢量,即待优化的台阶高度; v 为粒子的速度矢量; $\delta_{pbest,i}^k$ 为第 k 代循环第 i 个粒子的局部最优位置; δ_{gbest}^k 为第 k 代粒子的全局最优位置; v_i^k 为第 k 代第 i 个粒子的速度矢量。另外,对速度矢量 v_i^k 增加一个约束: $|v_i^k| \leq 0.25\delta_{max}$, 其中 v_i^k 为第 i 个粒子的速度矢量, δ_{max} 为粒子可能的最大位移矢量,即台阶最大高度。这保证了优化过程中每个波长的 PSF 变化不会过于剧烈,从而可以避免陷入局部最小或使优化无法收敛。在每次迭代中,每个粒子将根据从自身经验和社会经

验中搜集而来的信息 ($\delta_{pbest,i}^k, \delta_{gbest}^k$) 来更新速度矢量 v_i^k , 按照策略 $\delta_i^{k+1} = \delta_i^k + v_i^k$ 来优化,这除了可以充分利用粒子之间的并行性外,还能增强优化模型的全局寻优能力。

4 消色差衍射透镜的成像分析

为验证所提出的设计方法的可行性及有效性,本文将对所设计的衍射透镜进行仿真分析及实验验证。为了对比,本文共设计了 3 种类型的衍射透镜,分别为:菲涅耳衍射透镜、分区消色差衍射透镜和本文提出的编码优化消色差衍射透镜。考虑到现有条件及制造水平,设计参数如表 1 所示。

表 1 设计参数

Table 1 Design parameters

Type of lens	Fresnel diffractive lens	Zonal achromatic diffraction lens	Encoding optimized diffraction lens
F	12.5	12.5	12.5
Number of steps	8	8	8
Design band /nm	550	400-700	400-700
Diameter /mm	8	8	8

4.1 仿真分析

本文设计的编码优化消色差衍射透镜的优势在于:它可以获得设计可见光波段下均匀一致的 PSF。首先本文在 400~700 nm 波段上进行密集采样(415~685 nm,间隔为 10 nm),由于自然光谱的 PSF 分布是连

续的,因此通过对这 28 个离散波长优化消色差,最终可近似获得 400~700 nm 的连续可见光光谱消色差效果。本文对以上三种类型的衍射透镜在可见光下以及在均匀分布在光谱上的随机 5 个波长下的色差表现进行了仿真,评价指标主要为 PSF。图 3 分别展示了菲涅耳衍

射透镜、初始分区消色差衍射透镜、编码优化消色差衍射透镜在 8 mm 口径下的仿真 PSF 横截面,在可见光谱

上随机选取的 5 个波长分别为: $\lambda_1 = 455 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 505 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 555 \text{ nm}$, $\lambda_4 = 605 \text{ nm}$, $\lambda_5 = 655 \text{ nm}$ 。

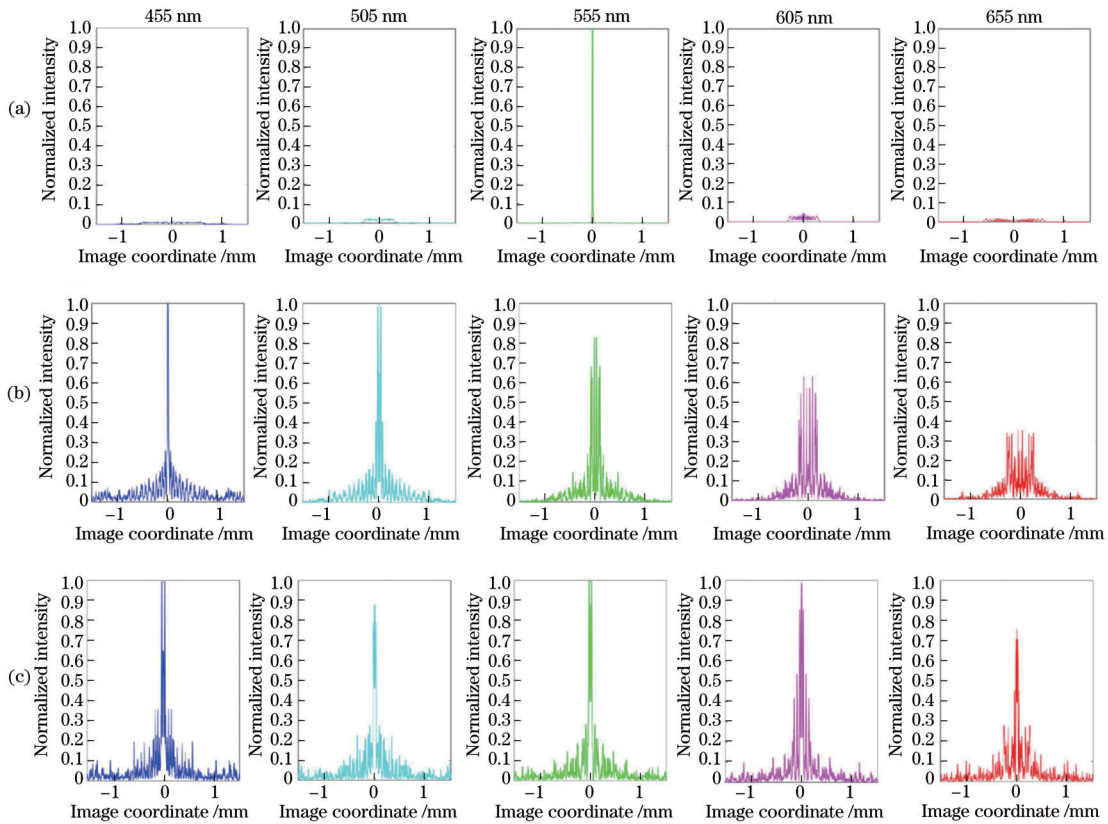


图 3 归一化光谱 PSF 分布。(a)菲涅耳衍射透镜;(b)初始分区消色差衍射透镜;(c)编码优化消色差衍射透镜

Fig. 3 Normalized spectral PSF distributions. (a) Fresnel diffractive lens; (b) initial zone achromatic diffractive lens; (c) coding optimized achromatic diffractive lens

由图 3 可见,传统菲涅耳衍射透镜只在其设计波段具有尖锐的谱峰,在其余非设计波段能量呈弥散状态,整个像面产生噪声,严重破坏成像质量,这也验证了衍射元件的大色散特性。微结构基于人为设计的初始分区消色差衍射透镜初步平衡了各个波长的聚焦作用,但越靠近透镜边缘时, 2π 的相位调制周期所对应的调制区域越窄,偏差越大。另外,非设计区域产生的噪声更多,该区域的聚焦效率不及透镜中心区域所对应波长的聚焦效率,所以分区消色差衍射透镜具有一定的消色差效果,但离本文的设计目标还有差距。

经过本文方法优化的消色差衍射透镜已经在整个

可见光光谱中的各个波长之间得到了近似一致的 PSF。对比传统菲涅耳衍射透镜,本文的算法牺牲了中心波长的聚焦性能,提升了光谱其他波长的聚焦贡献。虽然该方法在消色差的同时让 PSF 引入了较长的尾部,由此可能为图像带来模糊,但这是可以解决的,优化消色差衍射透镜在展宽 PSF 的同时还具有相对尖锐的谱峰,因此最后图像依然保留了高频信息,这为之后使用图像复原算法恢复清晰图像提供了可能。

本文通过调制传递函数(MTF)来说明优化后的衍射透镜像质损失情况,如图 4 所示。

图 4 显示了根据以上两种类型衍射透镜各波长平

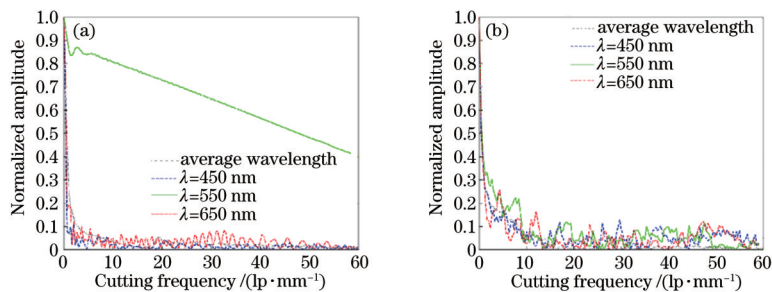


图 4 两种类型透镜的 MTF。(a)菲涅耳透镜;(b)编码优化消色差透镜

Fig. 4 MTF of two types of lenses. (a) Fresnel lens; (b) coding optimized achromatic lens

均 PSF 计算得到的 MTF。将各个波长的 MTF 进行平均加权后,传统菲涅耳透镜、编码优化消色差透镜的截止频率(以 0.1 作为对比度极限)分别为 2.6 lp/mm、8.6 lp/mm,并且在优化消色差透镜中,三个离散波长的 MTF 更为接近。因此本文设计的优化消色差衍射透镜不仅可以实现消色差,在可见光下的成像性能也优于传统菲涅耳衍射透镜。

4.2 成像测试分析

根据 4.1 节所提出的仿真设计参数,本文在同一片基底材料上以相同 F 数 8 mm 口径,通过三次套刻^[14]

制备了以上 3 种类型的 8 台衍射透镜。为检测各类型衍射透镜的成像性能,本节将搭建如图 5 所示的测试光路,并主要对 8 mm 口径的各类型衍射透镜的星点像、分辨率进行测试。其中,靶标主要指 10 μm 针孔以及标准分辨率板,除此之外还包括强度可调的卤素灯光源、3 个带通滤光片(中心波长分别为 488, 532, 632 nm, 半峰全宽为 10 nm, 峰值透过率为 50%)、平行光管(焦距为 1200 mm)、10 \times 显微物镜、彩色 CCD(大恒图像 MER-132-43GC, 像元尺寸为 3.75 $\mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$, 分辨率为 1292 pixel \times 964 pixel)。

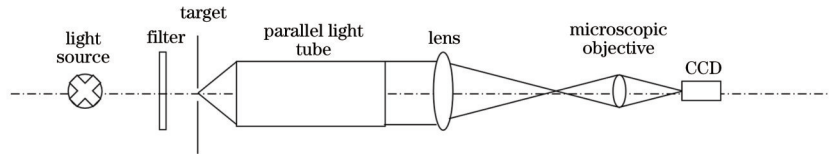


图 5 测试系统光路图

Fig. 5 Light path diagram of test system

星点像图不仅可以作为评价系统成像性能的指标之一,还可以测量系统的 PSF。星点测试法的原理是通过设置在平行光管焦面处的针孔与平行光管来形成平行光,以模拟无限远处物点成像的情形。其中针孔尺寸过大时会使得结果误差过大,针孔过小时不利于观察^[15]。

图 6 显示了实验测量得到的 3 种类型透镜的 PSF,传统衍射透镜在设计焦距处针孔像呈明显的绿色,优

化衍射消色差透镜在消色差的同时也减小了针孔像尺寸。经过计算可得,菲涅耳衍射透镜、初始分区消色差衍射透镜、编码优化消色差衍射透镜的平均 PSF 半径分别为 159.5, 136.3, 69.2 μm , 其与理论值 63.8 μm 的误差主要来源于:最小线宽限制或线宽位置误差造成的制造误差。测试过程中,由于中心未完全对准、像面位置误差带来的装调误差、平行光管自身像差,以及波带片本身带宽等都会对所得结果产生影响。

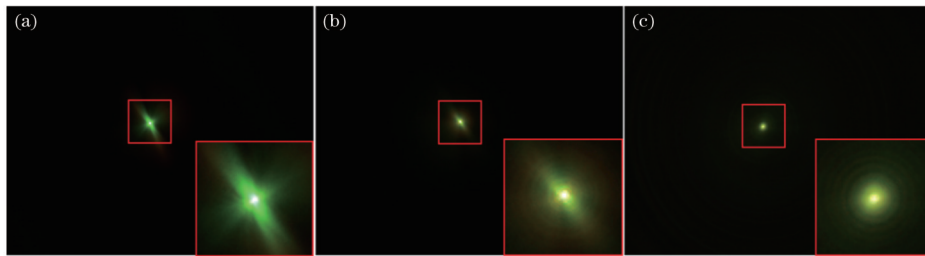


图 6 三种类型透镜的 PSF。(a)菲涅耳衍射透镜;(b)初始分区消色差衍射透镜;(c)编码优化消色差衍射透镜

Fig. 6 PSF of three types of lenses. (a) Fresnel diffractive lens; (b) initial zone achromatic diffractive lens; (c) coding optimized achromatic diffractive lens

图 7 进一步展示了优化消色差衍射透镜的离焦性能,显示了传统衍射透镜与优化衍射透镜在不同像距(像距从左到右依次为 80, 90, 100, 110, 120 mm)处的

针孔像。可以看到,随着像距的变化,编码优化消色差衍射透镜的针孔像色彩和形状基本固定,显然其离焦性能要优于传统菲涅耳衍射透镜。

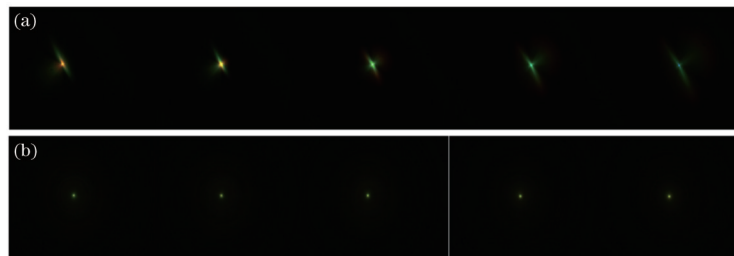


图 7 两种透镜的离焦针孔像。(a)菲涅耳衍射透镜;(b)编码优化消色差衍射透镜

Fig. 7 Defocus pinhole images of two lenses. (a) Fresnel diffraction lens; (b) coding optimized achromatic diffraction lens

本文通过分辨率靶来评估编码优化消色差透镜的分辨率,考虑到成本以及实际滤光片参数限制问题,选用 488, 532, 632 nm 三个波长的滤光片来验证编码优化 DOE 在设计波段的消色差效果。在卤素灯光源照明条件下,观察两种透镜在可见光以及三个离散波长(488, 532, 632 nm)的分辨率靶标图,传统菲涅耳透镜在设计波长处展现了接近衍射极限的成像性能,而边缘波长在像面处则呈弥散雾状,编码优化消色差透镜则明显改善这一状况,如图 8 所示。虽然最后的结

果留下了较大的模糊核,保留了残余像差,但是消色差后各个波长的模糊核已趋于一致,这降低了去卷积复原的难度,对于后续处理十分有利^[16]。为了避免彩色相机中去马赛克算法对原本图像分辨率的影响,使用灰度相机拍摄了卤素灯照明下传统菲涅耳 DOE 以及编码优化 DOE 的分辨率图像,如图 9 所示。可以看出,相较于菲涅耳 DOE,编码优化消色差 DOE 在分辨能力上也具有一定程度的提升。

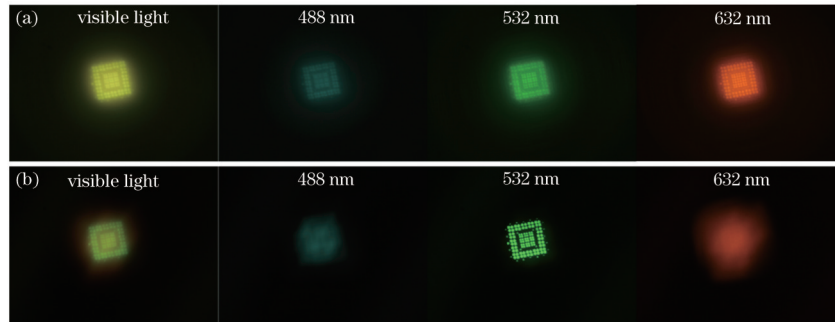


图 8 三个离散波长下的分辨率。(a)编码优化消色差衍射透镜;(b)传统菲涅耳衍射透镜

Fig. 8 Resolution of three discrete wavelengths. (a) Coding optimized achromatic diffractive lens; (b) traditional Fresnel diffractive lens

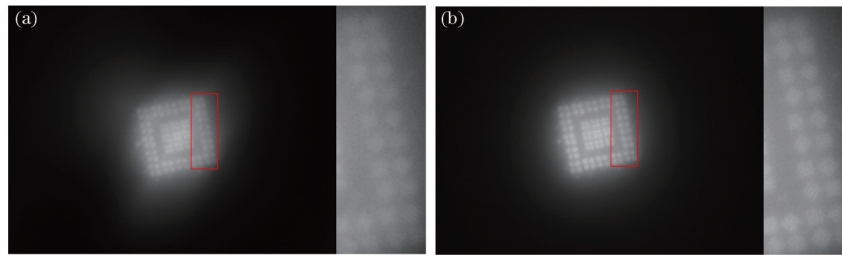


图 9 分辨率对比。(a)传统菲涅耳衍射透镜分辨率;(b)编码优化消色差衍射透镜分辨率

Fig. 9 Resolution comparison. (a) Resolution of traditional Fresnel diffractive lens; (b) resolution of coding optimized achromatic diffractive lens

5 结 论

提出一种基于高度编码优化的消色差衍射透镜设计方法,并从可见光下选取 28 个波段进行仿真验证和成像测试。结果表明,所提方法能够通过衍射透镜表面微结构高度进行编码优化的方式来调制各个波长的相位,以得到 400~700 nm 可见光谱下均匀统一的 PSF,从而实现消色差的目的。另外,将该优化衍射透镜与传统菲涅耳衍射透镜、基于分区思想的消色差衍射透镜进行对比。实验结果表明,所提出的基于高度编码优化的衍射消色差透镜在可见光光谱下的分辨率以及消色差能力均优于上述两种透镜,具有可行性和实用性。所提方法并不局限于可见光波段下的应用,还可以扩展至红外波段,利用所提方法校正其他像差^[17-18]也是未来可能的应用方向。

参 考 文 献

[1] 巩畅畅, 刘鑫, 范斌, 等. 基于 RGB 三波段的消色差衍射透镜设计与分析[J]. 光学学报, 2021, 41(11):

1105001.

Gong C C, Liu X, Fan B, et al. Design and analysis of diffractive achromats based on RGB three-band[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1105001.

[2] Davis A, Kühnlenz F. Optical design using Fresnel lenses: basic principles and some practical examples[J]. Optik & Photonik, 2007, 2(4): 52-55.

[3] Domber J L, Atcheson P D, Kommers J. MOIRE: ground test bed results for a large membrane telescope [C]//Spacecraft Structures Conference, January 13-17, 2014, National Harbor, Maryland, Virginia: AIAA Press, 2014: 1510.

[4] Nikonorov A, Skidanov R, Fursov V, et al. Fresnel lens imaging with post-capture image processing[C]//2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, June 7-12, 2015, Boston, MA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 33-41.

[5] Peng Y F, Fu Q, Amata H, et al. Computational imaging using lightweight diffractive-refractive optics[J]. Optics Express, 2015, 23(24): 31393-31407.

[6] Nikonorov A V, Petrov M V, Bibikov S A, et al.

- Toward ultralightweight remote sensing with harmonic lenses and convolutional neural networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(9): 3338-3348.
- [7] 李岩, 张葆, 洪永丰, 等. 谐衍射红外双波段双视场光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1122001.
Li Y, Zhang B, Hong Y F, et al. Optical design of harmonic diffractive infrared dual-band and dual-field system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1122001.
- [8] 毛珊, 解娜, 赵建林. 斜入射下双波段双层衍射光学元件优化设计与分析[J]. 光学学报, 2020, 40(16): 1605001.
Mao S, Xie N, Zhao J L. Optimal design and analysis of dual-band double-layer diffractive optical element under oblique incidence[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(16): 1605001.
- [9] Nakai T, Ogawa H. Research on multi-layer diffractive optical elements and their application to camera lenses [C]//Diffractive Optics and Micro-Optics, June 3-6, 2002, Tucson, Arizona, USA. Washington, D. C.: OSA, 2002: DMA2.
- [10] 李飞, 王克逸. RGB 三通道衍射望远镜光学成像系统设计[J]. 应用光学, 2019, 40(3): 369-372.
Li F, Wang K Y. Design of optical imaging system for RGB three-channel diffraction telescope[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(3): 369-372.
- [11] Goodman J W. Introduction to Fourier optics[M]. New York: McGraw-Hill, 1968.
- [12] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [13] Eberhart R C, Shi Y H. Particle swarm optimization: developments, applications and resources[C]//Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation, May 27-30, 2001, Seoul, Korea (South). New York: IEEE Press, 2001: 81-86.
- [14] Liu X, Gong C C, Fan B, et al. High precision fabrication method of Fresnel diffractive lenses on ultrathin membrane for imaging application[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(4): 2400310.
- [15] 王矫. 基于针孔像分析的光学传递函数测试技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2007: 23-35.
Wang J. Study of MTF measurement technique based on pinhole image analysis[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007: 23-35.
- [16] Dun X, Ikoma H, Wetzstein G, et al. Learned rotationally symmetric diffractive achromat for full-spectrum computational imaging[J]. Optica, 2020, 7(8): 913-922.
- [17] Peng Y F, Sun Q L, Dun X, et al. Learned large field-of-view imaging with thin-plate optics[J]. ACM Transactions on Graphics, 2019, 38(6): 1-14.
- [18] 何立风, 苏亮亮, 周广彬, 等. 多尺度残差聚合特征网络图像超分辨重建[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(24): 2410011.
He L F, Su L L, Zhou G B, et al. Image super-resolution reconstruction based on multi-scale residual aggregation feature network[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(24): 2410011.