

## 含单层衍射元件的可见宽波段计算成像系统设计

王翼昂<sup>1</sup>, 胡洋<sup>2\*\*</sup>, 朴明旭<sup>1\*</sup>, 张博<sup>1</sup>, 王喆<sup>1</sup>, 张承然<sup>1</sup>, 马德超<sup>1</sup><sup>1</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;<sup>2</sup>中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000

**摘要** 为消除单层衍射元件在可见光宽波段中低的衍射效率对成像质量的影响,根据探测器的量子效率,提出了设计波长的选择方法,构建了可见光宽波段折衍混合系统受衍射效率影响的点扩散函数(PSF)模型。使用构建的 PSF 模型进行图像复原,提高了折衍混合系统的图像质量。为了验证所提方法的有效性,将单层衍射光学元件引入目前已有的专利物镜系统中进行优化设计,优化后的系统中不仅光学元件的数量得到了减少,还将波段范围从 486.1~656.3 nm 扩展至 400.0~800.0 nm。利用所提方法对波段范围扩展后的低衍射效率图像进行复原,复原后的图像质量不论在主观上还是客观上都有明显提升,这说明所提方法可用于含单层衍射元件的可见光宽波段系统设计。

**关键词** 光学设计; 点扩散函数; 衍射效率; 计算成像

**中图分类号** O436

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS221683

## 1 引言

衍射光学元件(DOE)是通过表面的浮雕结构对入射光相位进行调制的一类光学器件,被广泛应用于光学系统中。衍射光学元件具有特殊的色散特性和温度特性,将其应用于传统折射成像系统中可以简化系统结构、减轻系统重量,从而实现传统系统较难实现的性能指标<sup>[1-7]</sup>。单层衍射光学元件具有结构简单、易加工和成本低的特点。然而,单层衍射光学元件在入射波长远离中心波长后衍射效率明显下降,低衍射效率将严重影响成像质量,故单层衍射光学元件只能应用于波段范围窄的光学系统中。

为了提高宽波段衍射效率,出现了多层衍射光学技术。Wood等<sup>[8]</sup>构建了一种新的闪耀二元结构来提高双层衍射元件在红外宽波段中的衍射效率。马韬等<sup>[9]</sup>通过层叠多个单层表面微结构将双层衍射元件在 0.4~0.8 μm 波段的衍射效率提高到了 96% 以上。范长江等<sup>[10]</sup>将双层衍射元件中间的空气层换成了光学塑料,通过低折射率高色散材料和高折射率低色散材料的组合使得全视场角最大为 110°时,在 0.4~0.7 μm 波段的衍射效率大于 90%。虽然双层衍射元件在宽波段中具有高衍射效率,但是与单层衍射元件相比,其结构复杂,且衍射效率易受加工误差、环境温度等因素影响<sup>[11-15]</sup>。计算成像近些年来发展迅速<sup>[16-18]</sup>,将其应用在衍射光学方面,可以解决传统光学技术无法解决的

难题。Peng等<sup>[19]</sup>使用计算成像的方法来校正可见光波段轻量化折衍混合光学系统的色差,提升了轻量化折衍混合光学系统的成像质量。胡洋等<sup>[20]</sup>提出了一种光学-数字联合系统的设计方法,提升了含有单层衍射元件的光学系统在红外双波段的成像质量,但其所提方法仅适用于红外波段的黑白图像,并不适用于可见光的彩色图像。

本文针对单层衍射元件在可见光宽波段中低衍射效率造成的成像模糊问题,将计算成像技术应用于折衍混合系统设计中,构建了可见光宽波段受衍射效率影响的点扩散函数(PSF)模型,提出了衍射元件设计波长的选择方法。根据所提方法,对目前已有专利镜头进行了光学数字一体化设计,通过对比可知,所设计系统在简化结构、扩展波段范围的同时,消除了单层衍射元件在宽波段的低衍射效率对成像质量的影响。

## 2 基本原理

图像退化指在图像形成、传输的过程中,因成像系统的不完善,图像清晰度被降低的现象。光学系统成像就是一个图像退化的过程,清晰的图像 $f(x, y)$ 经过光学系统与退化函数 $q(x, y)$ 卷积后加上噪声 $h(x, y)$ 得到了图像 $g(x, y)$ <sup>[21]</sup>,其成像过程可描述为

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes q(x, y) + h(x, y). \quad (1)$$

在光学系统成像过程中,PSF 即是退化函数。本文利用这种成像原理,将 PSF 当作复原函数,逆向求

收稿日期: 2022-09-06; 修回日期: 2022-10-04; 录用日期: 2022-10-14; 网络首发日期: 2022-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(62105041)、吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20220741KJ, JJKH20220748KJ)

通信作者: \*piaomingxu123@126.com; \*\*huyangcclg@163.com

得清晰图像,以提高衍射元件在可见光波段中的成像质量。

## 2.1 可见光波段单层衍射元件点扩散函数模型构建

对于成像衍射光学元件,衍射效率是核心指标,直接决定了成像衍射光学元件的应用范围。单层衍射元件的衍射效率<sup>[22]</sup>可以表示为

$$\eta(\lambda) = \text{sinc}^2 \left[ m - \frac{\lambda_0}{\lambda} \cdot \frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} \right], \quad (2)$$

式中: $m$ 为衍射级次; $\lambda_0$ 为中心波长; $\lambda$ 为入射波长; $n(\lambda)$ 和 $n(\lambda_0)$ 分别为基底材料在入射波长和中心波长处的折射率。 $n(\lambda)$ 和 $n(\lambda_0)$ 与基底材料有关,相应的计算公式<sup>[23]</sup>为

$$n^2(\lambda) = a_0 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda^{-2} + a_3\lambda^{-4} + a_4\lambda^{-6} + a_5\lambda^{-8}, \quad (3)$$

式中: $a_0 \sim a_5$ 为基底材料参数。目前常用的一些光学设计软件在计算光学系统的PSF时,将所有波长给定级次的衍射效率都当作100%,这会导致实际系统成像质量与理论计算之间存在偏差。因此,为了保证后续图像复原的准确性,需要重新构建一个受衍射效率影响的PSF模型。

PSF被认为是成像过程中的退化函数,在后期的

图像复原中被用作复原函数。因此,一个合理的PSF对图像的复原结果起着至关重要的作用,构建受衍射效率影响的PSF模型,共分为以下三步<sup>[24]</sup>。

首先,需要构建出特征波长 $\lambda$ 的 $m$ 级次的能量分布 $P(\lambda, m)$ 。可由式(1)求出 $\lambda$ 的 $m$ 级次的衍射效率,将其平均地分配在弥散斑内。

然后,求出特征波长 $\lambda$ 所有分析级次的能量分布并将其叠加。特征波长 $\lambda$ 所有分析级次的能量分布 $P(\lambda)$ 的计算公式为

$$P(\lambda) = \sum_m P(\lambda, m). \quad (4)$$

最后,根据弥散斑的变化情况划分特征波长。每当波长改变导致弥散斑最大半径变化一个像元尺寸时取一个特征波长。按照之前的方法求出所有特征波长的 $P(\lambda)$ ,并按照权重进行叠加后进行归一化,求出整个系统的PSF,相应表达式为

$$F_{\text{PS}}(\lambda) = \frac{\sum_{\lambda} \omega_{\lambda} P(\lambda)}{\sum_{\lambda} \sum_m \eta_m(\lambda)}, \quad (5)$$

式中: $\omega_{\lambda}$ 为 $\lambda$ 波长时的权重系数; $\eta_m(\lambda)$ 为在 $\lambda$ 波长、 $m$ 级次时的衍射效率。PSF构建总体流程示意图如图1所示。

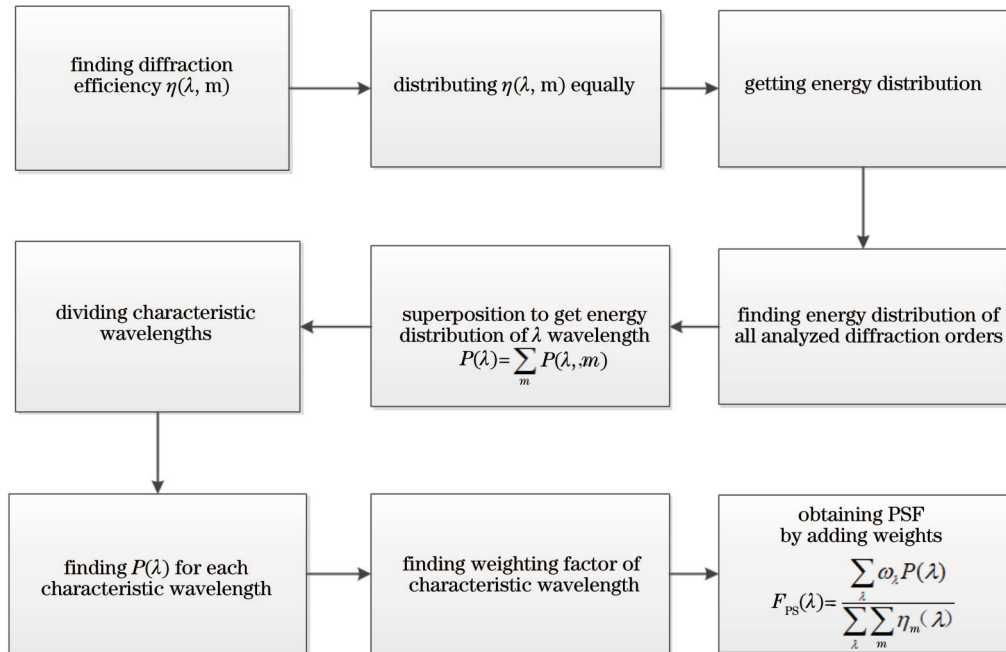


图 1 PSF 构建流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PSF construction process

CCD、CMOS 等探测器芯片的主要功能是将光信号转换为电信号,电信号经过处理器后被转换为图像文件。评价探测器的主要性能指标有量子效率、饱和曝光量、噪声和暗电流等。其中,量子效率是对芯片成像质量的一种微观描述<sup>[25]</sup>,是影响芯片成像质量的主要参数。量子效率是指芯片在某特定波长下,入射光

在器件像元中产生并被收集的电子数与入射光子数的比值,相应的表达式<sup>[26]</sup>为

$$E_{\text{Q}} = \frac{1}{K} \cdot \frac{I}{E} \cdot \frac{hc}{\lambda At}, \quad (6)$$

式中: $K$ 为元件的增益系数; $I$ 为响应信号输出; $E$ 为传感器表面的辐射照度; $h$ 为普朗克常数; $c$ 为光速; $A$ 为

传感器表面区域的面积;  $t$  为曝光时间。光学系统在可见光波段的成像为彩色图像, 而彩色图像通常表示为 RGB 图像, 即 R、G、B 三张灰度图片的“叠加”。对于彩色图像, 可见光探测器在 R、G、B 三通道对不同波长的量子效率不同。图 2 为美国安森美公司生产的 NOIP1SN5000A-D 型 CMOS 的 R、G、B 三通道的量子效率示意图。

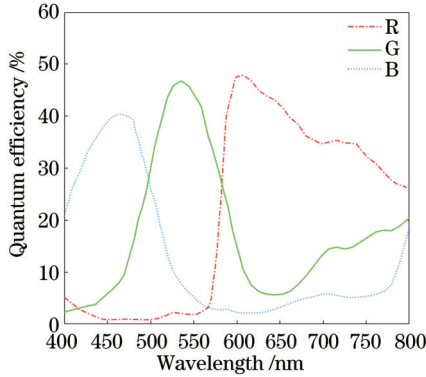


图 2 NOIP1SN5000A-D 型 CMOS 的量子效率示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of quantum efficiency of NOIP1SN5000A-D type CMOS

由式(6)可知量子效率是关于波长的函数, 体现了探测器对不同波长的能量响应程度, 直接影响成像效果。不同的特征波长对应的量子效率不同, 故探测器对不同特征波长的响应度也不同。为了得到准确的成像效果, 需要将量子效率作为权重进行 PSF 的构建, 构建后 R、G、B 三通道的 PSF 模型为

$$\left\{ \begin{aligned} F_{PS,R} &= \frac{\sum_{\lambda} \omega_R P(\lambda)}{\sum_{\lambda} \sum_m \eta_m(\lambda)} \\ F_{PS,G} &= \frac{\sum_{\lambda} \omega_G P(\lambda)}{\sum_{\lambda} \sum_m \eta_m(\lambda)}, \\ F_{PS,B} &= \frac{\sum_{\lambda} \omega_B P(\lambda)}{\sum_{\lambda} \sum_m \eta_m(\lambda)} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中:  $\omega_R$ 、 $\omega_G$ 、 $\omega_B$  分别为 R、G、B 通道归一化后的量子效率。

### 2.2 设计波长的选择

单层衍射元件在设计波长处可以取得高衍射效率, 但当波长偏离设计波长时衍射效率迅速下降, 故单层衍射元件难以做到在可见光的宽波段中清晰成像。由图 2 可知, 可见光探测器在 R、G、B 三通道都各自只在特定波长范围内具有较高的量子效率, 很难找到一个设计波长使三通道同时具有高衍射效率和高量子效率。因此, 本文在选择设计波长时优先考虑让一个通道同时获得较高的量子效率和衍射效率, 在保证该通道成像较为清晰的同时, 使其他两个通道也可以获得相对较高的衍射效率。在单层衍射元件的设计过程中, 将第一级次作为设计级次。在设计波长的选择过程中需要尽可能地保证三个通道有较高的一级衍射效率。由图 2 可知, B 通道在波长为 460 nm 处量子效率最高, G 通道在 540 nm 处量子效率取到最大值, 而 R 通道达到最高量子效率的波长为 610 nm。将 460、540、610 nm 作为设计波长的备选项, 分析其在以聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 为基底材料、波段为 400~800 nm 时第一级次的衍射效率, 如图 3 所示。

由图 3 可知, 不同波长处的一级衍射效率并不相同。表 1 列出了当选取 460、540、610 nm 作为设计波长时在部分特定波长处的一级衍射效率。

表 1 不同设计波长在部分特定波长处的一级衍射效率

Table 1 First-order diffraction efficiencies at specified wavelengths under different design wavelengths unit: %

| Design wavelength / nm | 400 nm | 460 nm | 540 nm | 610 nm | 800 nm |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 460                    | 91.18  | 100.00 | 92.03  | 79.68  | 50.27  |
| 540                    | 59.65  | 88.91  | 100.00 | 95.30  | 67.90  |
| 610                    | 28.88  | 65.50  | 93.95  | 100.00 | 81.71  |

由图 3(c) 和表 1 可知, 当将设计波长设为 610 nm 时, 在入射波长为 400 nm 的第一级次衍射效率仅为 28.88%, 将严重影响图像复原质量, 故不可选取

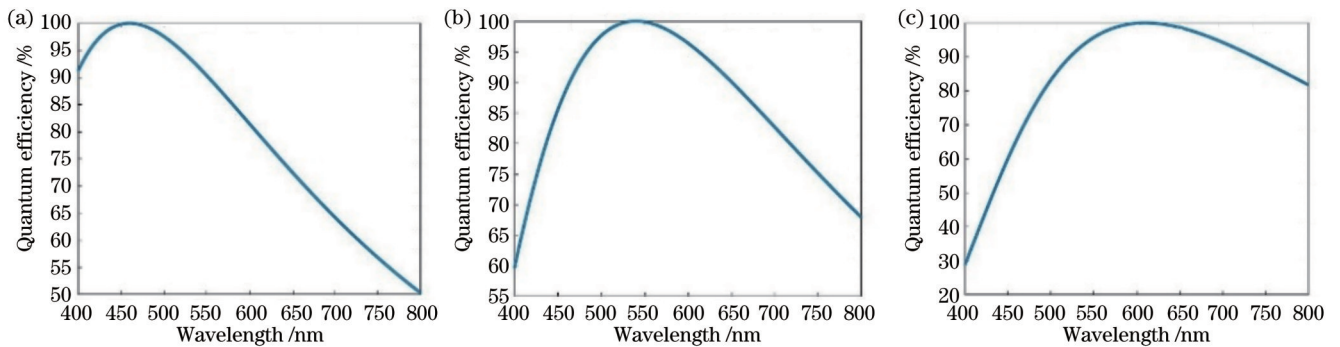


图 3 不同设计波长时第一级次的衍射效率。(a) 460 nm; (b) 540 nm; (c) 610 nm

Fig. 3 First-order diffraction efficiencies under different design wavelengths. (a) 460 nm; (b) 540 nm; (c) 610 nm

610 nm 作为设计波长。由图 3(a)、(b)可知,当选取设计波长分别在 460 nm 和 540 nm 处时,总体上看一级衍射效率相差不大。当设计波长为 460 nm 时,单层衍射元件在 540 nm 和 610 nm 处的衍射效率分别为 92.03% 和 79.68%,且在 800 nm 波长处的衍射效率也略低,仅有 50.27%。当设计波长为 540 nm 时,单层衍射元件在 460 nm 和 610 nm 处的衍射效率分别为 88.91% 和 95.30%。相比于选取 460 nm 作为设计波长,选取 540 nm 可以使其他两个通道获得较高的衍射效率,有利于后续的图像重建,故选取 540 nm 作为单层衍射元件的设计波长。

### 3 设计实例

#### 3.1 光学系统设计

本文对专利号为 US4863251<sup>[27]</sup>的系统进行了优化。专利系统的焦距为 50 mm,  $F$  数为 5.6, 全视场为  $34^\circ$ , 应用波段为 486.1~656.3 nm, 总长为 64 mm。根据系统选取美国安森美公司的分辨率为 2592 pixel $\times$ 2048 pixel、像元尺寸为 4.8  $\mu\text{m}$  的 NOIP1SN5000A-D 型探测器。专利光学系统的指标参数如表 2 所示, 系统结构图如图 4 所示。

表 2 专利系统参数

Table 2 Parameters of patent system

| Parameter                   | Value       |
|-----------------------------|-------------|
| $F$ -number                 | 5.6         |
| Focal length /mm            | 50          |
| Field of view /( $^\circ$ ) | 34          |
| Wavelength /nm              | 486.1-656.3 |

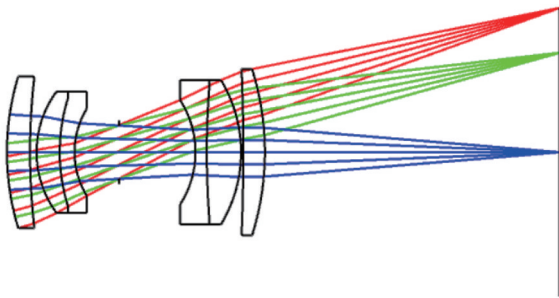


图 4 专利系统结构图

Fig. 4 Structural diagram of patent system

专利系统采用了 6 片透镜组成的双高斯式结构, 由两组双胶合透镜和两片凸透镜组成, 光阑位于系统中间。专利系统的波段范围是可见光的 F、d、c 光波段。专利系统在空间频率为 100 lp/mm 时的调制传递函数(MTF)值大于 0.36, 拥有较好的成像质量, 其 MTF 曲线如图 5 所示。

对专利系统进行了优化, 引入了单层衍射光学元件。优化后的系统由 4 片单镜片组成, 考虑到对称式结构不仅拥有较好的像场平整度, 还可以校正彗差、倍

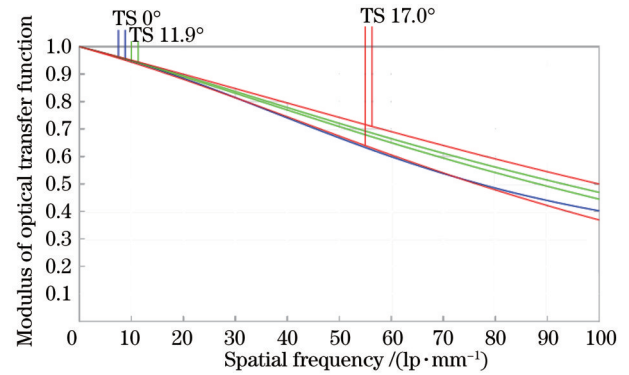


图 5 专利系统的 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curve of patent system

率色差和畸变等光学像差, 故仍将光阑放置在系统中间, 保留了双高斯式结构。为了简化系统结构, 将原系统的两组胶合透镜优化成 2 片单透镜, 优化后的前 3 片玻璃采用常规玻璃, 第 4 片透镜采用光学塑料 PMMA, 将衍射面设置在第 4 片透镜的后表面处。在指标不变的情况下, 优化后的系统将使用波段拓宽至 400.0~800.0 nm, 提升了成像质量, 优化后的系统结构图如图 6 所示。

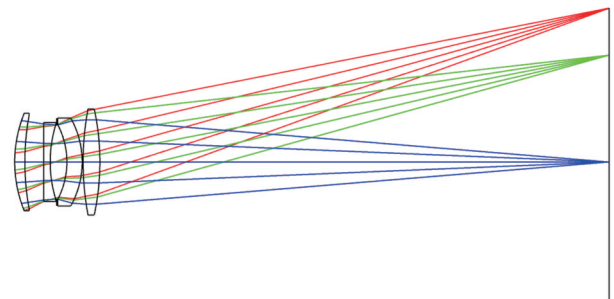


图 6 优化后系统结构图

Fig. 6 Structural diagram of optimized system

当不考虑衍射效率时, 优化系统在空间频率为 100 lp/mm 时的 MTF 值大于 0.36, 与专利系统的 MTF 基本相同。优化系统的 MTF 曲线如图 7 所示。

虽然引入单层衍射元件扩展了光学系统的使用波

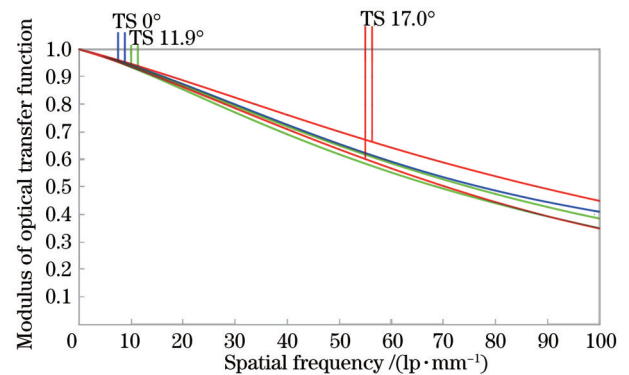


图 7 优化后系统的 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curve of optimized system

段和减少了镜片的使用数量,但是单层衍射元件在宽波段的低衍射效率将影响成像质量,故需要对探测器接收到的模糊图像进行复原。

### 3.2 点扩散函数模型构建

按照 2.1 节图 1 所提到的构建 PSF 模型的方法对

优化系统进行 PSF 模型的构建。先构建所有波长的 PSF 模型,再引入探测器不同通道的量子效率权重,得到不同通道的 PSF 模型。构建后 R、G、B 通道的 PSF 模型如图 8~10 所示。

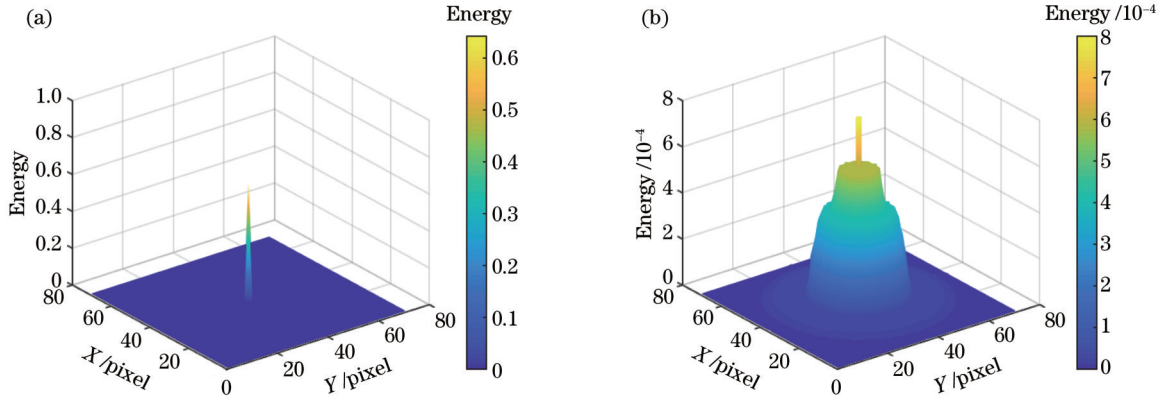


图 8 构建出的 R 通道 PSF 模型。(a) 总体;(b) 局部放大  
Fig. 8 Constructed R-channel PSF model. (a) Overall; (b) partial magnification

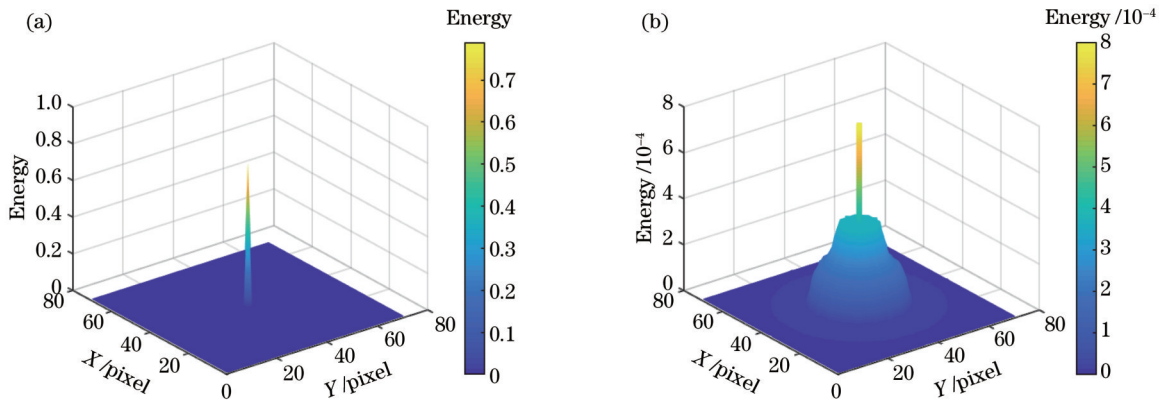


图 9 构建出的 G 通道 PSF 模型。(a) 总体;(b) 局部放大  
Fig. 9 Constructed G-channel PSF model. (a) Overall; (b) partial magnification

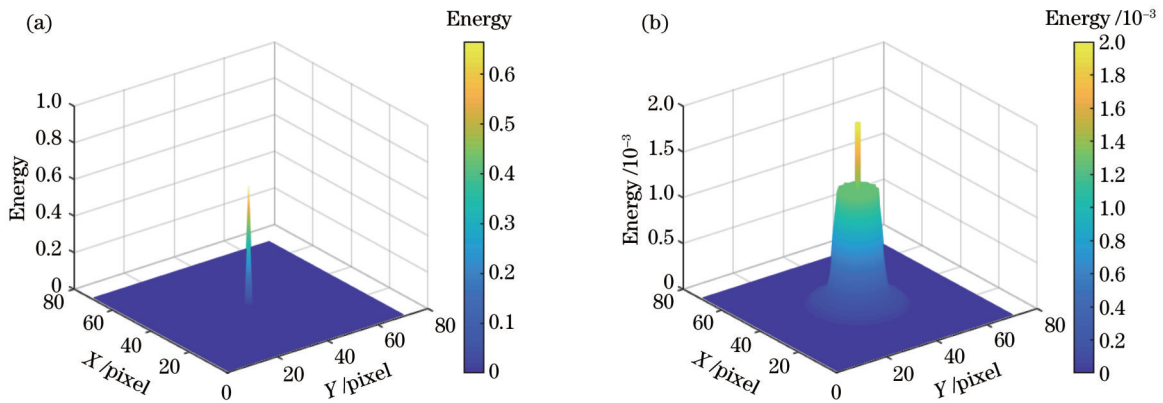


图 10 构建出的 B 通道 PSF 模型。(a) 总体;(b) 局部放大  
Fig. 10 Constructed B-channel PSF model. (a) Overall; (b) partial magnification

如图 8(a) 所示,R 通道构建的 PSF 模型归一化后的中心能量为 0.6427,0.3573 的能量分布在其余级次

的弥散斑范围内,如图 8(b) 所示。图 9 为 G 通道的 PSF 模型示意图,归一化后的中心能量为 0.7894,通

道中心能量较其他两通道高,拥有较高的对比度。图 10(a)为 B 通道的 PSF 模型示意图,其中心能量为 0.6652。剩余的能量分布在其余级次的弥散斑中,如图 10(b)所示。

#### 4 复原结果与分析

根据 3.2 节所构建的 PSF 模型,采用 Richardson-Lucy 算法<sup>[28]</sup>对模拟仿真图像 R、G、B 三通道的图像进行复原,复原结果如图 11 所示。

如图 11 所示,复原后的彩色图像与复原前的图像相比,图片的对比度提高,细节更为丰富,瓷砖缝隙的线条更加明显,水管处的阴影效果也更加突出。将图

11(c)、(d)的彩色图片的 R、G、B 通道复原前后的灰度图进行对比,如图 12 所示。

如图 12 所示,R、G、B 通道的图像在复原后清晰度有较为明显的改善,且复原后图像的线条更为清晰,对比度有较大的提升,从主观上可以清楚地判断出图像质量有所提高。同时,选用了无参考两级框架评价(BIQI)函数<sup>[29]</sup>和平均灰度梯度(GMG)函数<sup>[30]</sup>两种图像评价方法来对复原前后图像进行客观评价。其中,GMG 评价价值越大代表图像质量越好,BIQI 数值越接近 0 代表图像失真越小。分别对复原前后的 R、G、B 通道的图像和彩色图像进行了评价,结果如表 3 所示。

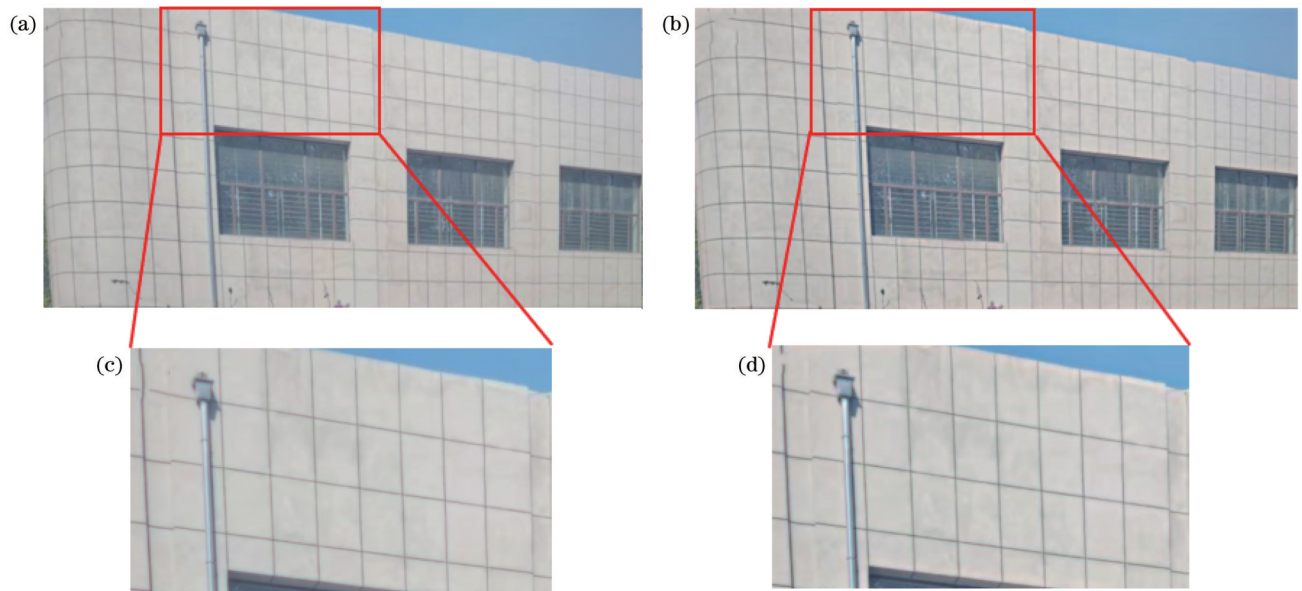


图 11 彩色图像复原结果对比。(a)复原前图像;(b)复原后图像;(c)复原前图像局部放大;(d)复原后图像局部放大

Fig. 11 Comparison of color image restoration results. (a) Image before restoration; (b) image after restoration; (c) partial magnification of image before restoration; (d) partial magnification of image after restoration

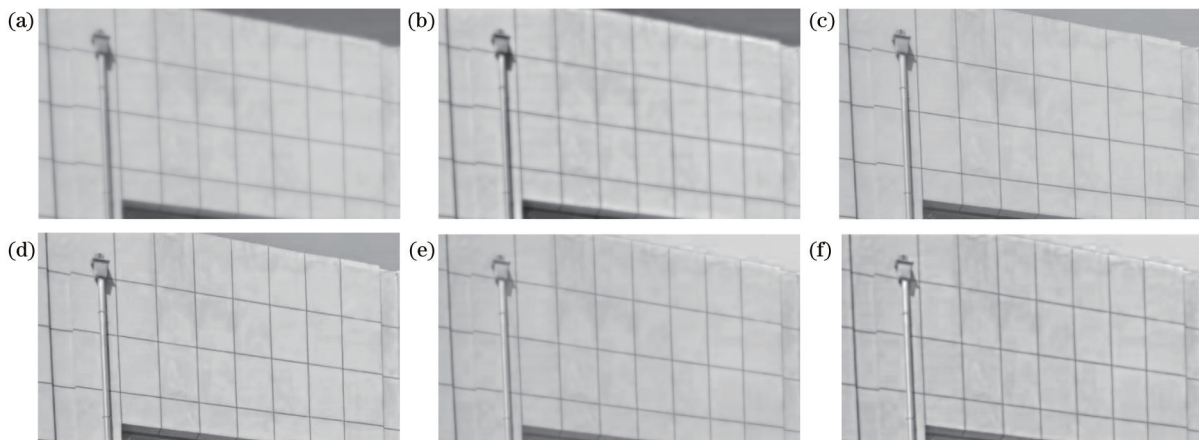


图 12 R、G、B 通道灰度图复原前后对比。(a) R 通道灰度图复原前;(b) R 通道灰度图复原后;(c) G 通道灰度图复原前;(d) G 通道灰度图复原后;(e) B 通道灰度图复原前;(f) B 通道灰度图复原后

Fig. 12 Comparison of gray images of R, G, B channels before and after restoration. (a) Gray image of R channel before restoration; (b) gray image of R channel after restoration; (c) gray image of G channel before restoration; (d) gray image of G channel after restoration; (e) gray image of B channel before restoration; (f) gray image of B channel after restoration

表 3 图像评价结果  
Table 3 Image evaluation results

| Evaluation method | R       |          | G       |          | B       |          | Color   |          |
|-------------------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
|                   | Blurred | Restored | Blurred | Restored | Blurred | Restored | Blurred | Restored |
| BIQI              | 45.96   | 43.67    | 34.22   | 32.36    | 38.71   | 38.23    | 36.64   | 35.06    |
| GMG               | 1.73    | 2.62     | 2.69    | 3.35     | 2.05    | 3.06     | 2.15    | 3.01     |

由表 3 可知:复原后 R 通道灰度图的 BIQI 值降低了 5.00%、GMG 值提升了 51.61%;复原后 G 通道灰度图的 BIQI 值降低了 5.44%、GMG 值提升了 24.28%;复原后 B 通道灰度图的 BIQI 值降低了 1.23%、GMG 值提升了 48.79%;复原后彩色图像 BIQI 值降低了 4.30%、GMG 值提升了 40.33%。表 3 所示结果从客观上说明所提方法增强了可见光宽波段衍射系统的图像质量,验证了所提方法的有效性。

## 5 结 论

针对单层衍射元件在可见光宽波段的低衍射效率对成像质量的影响,提出了一种基于计算成像的光学系统优化设计方法,构建了可见光宽波段受衍射效率影响的 PSF 模型,提升了含单层衍射元件的可见光宽波段系统的图像质量。使用所提设计方法进行仿真模拟,所得到的复原后的图像在主观上较原图像更为清晰。在客观上,使用了 BIQI 函数和 GMG 函数评价复原前后的 R 通道图像、G 通道图像、B 通道图像和彩色图像:当使用 BIQI 函数进行评价时,复原后图像的评价数值较原图像分别降低 5.00%、5.44%、1.23%、4.30%;当使用 GMG 函数进行评价时,复原后图像的评价数值较原图像分别提升 51.61%、24.28%、48.79%、40.33%。仿真结果表明,所提方法可以有效提高含单层衍射光学元件的可见光宽波段光学系统的成像质量,为实现单层衍射元件在可见光宽波段上的应用提供了一种新的思路。

## 参 考 文 献

- Lin H, Xu Z Q, Cao G Y, et al. Diffraction-limited imaging with monolayer 2D material-based ultrathin flat lenses[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 137.
- 高旭东, 崔庆丰, 郑汉青, 等. 宽温度范围的深紫外光学系统无热化设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(17): 1722001.  
Gao X D, Cui Q F, Zheng H Q, et al. A thermalization design of deep ultraviolet optical system with wide temperature range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1722001.
- Robert K, Elias S, David F, et al. Ultra-thin 3D lensless fiber endoscopy using diffractive optical elements and deep neural networks[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(4): 415-424.
- 王琦, 朴明旭, 孟禹彤, 等. 红外双波段共光路环形孔径超薄成像系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(3): 190-198.  
Wang Q, Piao M X, Meng Y T, et al. Design of infrared dual-band common path annular aperture ultrathin imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 190-198.
- Bajt S, Prasciolu M, Fleckenstein H, et al. X-ray focusing with efficient high-NA multilayer Laue lenses[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(3): 17162.
- 孙艳玲, 李江波, 蔡鑫, 等. 与整流罩共形的衍射光学系统设计(特邀)[J]. *光子学报*, 2021, 50(10): 1022001.  
Sun Y L, Li J B, Cai X, et al. Design of diffractive optical system conformal to farings (invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(10): 1022001.
- Cheng D W, Wang Q W, Liu Y, et al. Design and manufacture AR head-mounted displays: a review and outlook[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(3): 350-369.
- Wood A, Lee M S L, Cassette S. Infrared hybrid optics with high broadband efficiency[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5874: 58740G.
- 马韬, 沈亦兵, 杨国光. 利用多层表面微结构提高 DOE 宽波段衍射效率[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(1): 119-123.  
Ma T, Shen Y B, Yang G G. Improving diffraction efficiency of DOE in wide waveband application by multilayer micro-structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 119-123.
- 范长江, 赵亚辉, 应朝福, 等. 宽光谱大视场角的高衍射效率多层衍射元件[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0516001.  
Fan C J, Zhao Y H, Ying C F, et al. Multilayer diffraction element with wide field of view and high diffractive efficiency[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(5): 0516001.
- Piao M X, Cui Q F, Zhang B. Effect of ambient temperature and substrate material selection on diffraction efficiency for diffractive optical elements[J]. *Optik*, 2018, 166: 189-198.
- 赵丽东, 崔庆丰, 毛珊, 等. 衍射元件表面粗糙度对衍射效率的影响[J]. *光子学报*, 2018, 47(8): 0822002.  
Zhao L D, Cui Q F, Mao S, et al. Effect on diffraction efficiency of diffractive optics with consideration of surface roughness[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(8): 0822002.
- Zhang B, Cui Q F, Piao M X. Effect of substrate material selection on polychromatic integral diffraction efficiency for multilayer diffractive optics in oblique incident situation[J]. *Optics Communications*, 2018, 415: 156-163.
- 裴雪丹, 崔庆丰, 冷家开. 入射角对双层衍射光学元件衍射效率的影响[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 120-125.  
Pei X D, Cui Q F, Leng J K. Effect of incident angle on diffraction efficiency of a two-layer diffractive optical element[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 120-125.
- Piao M X, Cui Q F, Zhu H, et al. Diffraction efficiency change of multilayer diffractive optics with environmental temperature [J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(3): 035707.
- 郑汉青, 崔庆丰, 胡洋, 等. 大视场 Ritchey-Chretien 光学系统的间接成像方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(5): 0522002.  
Zheng H Q, Cui Q F, Hu Y, et al. Indirect imaging method of Ritchey-Chretien optical system with large field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(5): 0522002.
- 翁嘉文, 欧阳浩艺, 杨初平. 基于振幅空间调制条纹投影的单像素成像[J]. *光学学报*, 2021, 41(15): 1511003.  
Weng J W, Ouyang H Y, Yang C P. Single pixel imaging based on fringe projection with amplitude spatial modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15): 1511003.
- 李江勇, 冯位欣, 刘飞, 等. 机载多尺度广域高分辨率成像系统设计[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0208002.  
Li J Y, Feng W X, Liu F, et al. Design of airborne multi-scale wide-field-of-view and high-resolution imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0208002.
- Peng Y F, Fu Q, Amata H, et al. Computational imaging using

- lightweight diffractive-refractive optics[J]. Optics Express, 2015, 23(24): 31393-31407.
- [20] 胡洋, 崔庆丰, 孙林, 等. 红外双波段衍混光光学-数字联合系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1422002.  
Hu Y, Cui Q F, Sun L, et al. Optical-digital joint design of a dual-waveband infrared refractive-diffractive system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1422002.
- [21] (美)冈萨雷斯, (美)伍兹. 数字图像处理[M]. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2017: 197-198.  
Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing[M]. Ruan Q H, Ruan Y Z, Transl. 3rd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2017: 15-28.
- [22] 胡洋. 衍射计算成像宽波段光学系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021: 22-26.  
Hu Y. Research on wide waveband optical system for diffractive computational imaging system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021: 22-26.
- [23] 王艳辉, 李淑凤, 张佼, 等. 色散公式计算精度研究[J]. 物理与工程, 2016, 26(S1): 44-48.  
Wang Y H, Li S F, Zhang J, et al. Study on the calculation accuracy of dispersion formula[J]. Physics and Engineering, 2016, 26(S1): 44-48.
- [24] Hu Y, Cui Q F, Zhao L D, et al. PSF model for diffractive optical elements with improved imaging performance in dual-waveband infrared systems[J]. Optics Express, 2018, 26(21): 26845-26857.
- [25] 周红平. CCD 图像传感器原理[J]. 中国新技术新产品, 2009(20): 28-29.  
Zhou H P. Principle of CCD image sensor[J]. China New Technologies and Products, 2009(20): 28-29.
- [26] 孙昊洋. CCD 芯片量子效率和非均匀性参数测量[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 6-7.  
Sun H Y. The measurement of CCD chip's quantum efficiency and uniformity parameters[D]. Xi'an: Xidian University, 2014: 6-7.
- [27] Herloski R P, Seachman N J, Price E E, et al. Double gauss lens for a raster input scanner: US4863251[P/OL]. 2022-07-05. <https://www.freepatentsonline.com/4863251.html>.
- [28] Cui G M, Feng H J, Xu Z H, et al. A modified Richardson-Lucy algorithm for single image with adaptive reference maps[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 58: 100-109.
- [29] Moorthy A K, Bovik A C. A two-step framework for constructing blind image quality indices[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(5): 513-516.
- [30] Zeng Y L, Lan J H, Ran B, et al. Restoration of motion-blurred image based on border deformation detection: a traffic sign restoration model[J]. PLoS One, 2015, 10(4): e0120885.

## Design of Visible Broadband Computational Imaging System with Single-Layer Diffractive Element

Wang Yiang<sup>1</sup>, Hu Yang<sup>2\*\*</sup>, Piao Mingxu<sup>1\*</sup>, Zhang bo<sup>1</sup>, Wang Zhe<sup>1</sup>, Zhang Chengran<sup>1</sup>,  
Ma Dechao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;*

<sup>2</sup>*Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment of Aviation Industry Corporation of China, Ltd., Luoyang 471000, Henan, China*

### Abstract

**Objective** As the low diffraction efficiency of the single-layer diffractive element in the visible broadband results in blurred images and poor contrast, an optical-digital joint design method is proposed to solve this problem. Diffractive optical elements have special dispersion characteristics and temperature characteristics. When they are applied to the traditional refraction imaging system, the structure of the system can be simplified, and the weight of the system can be reduced. The performance index that is difficult to achieve in the traditional system can be achieved. The single-layer diffractive optical element features a simple structure, easy processing, and low costs. However, when the incident wavelength is far away from the central wavelength, the diffraction efficiency of the single-layer diffraction optical element will be significantly reduced, and the imaging quality will be severely affected by the low diffraction efficiency. Therefore, the single-layer diffractive optical element can only be applied to an optical system with a narrow wavelength range. As a result, multi-layer diffractive optical technology has emerged to improve the diffraction efficiency in the broadband. Despite the high diffraction efficiency of the multi-layer diffractive element in the broadband, its structure is complex, and the diffraction efficiency is easily affected by factors such as processing errors and ambient temperature compared with the single-layer diffractive element. Therefore, we hope to propose a design method combined with computational imaging to improve the visible broadband imaging quality of the single-layer diffractive element and expand the applicable band of the single-layer diffractive element.

**Methods** The imaging process of the optical system is the process of image degradation. After a clear image passes through the optical system, convolves with the point spread function (PSF) of the optical system, and is added with noise,



a new image is obtained. Therefore, the PSF can be used as a restoration function to perform a deconvolution operation on the obtained image to produce a clear image. Since the PSF obtained in the optical design software does not consider diffraction efficiency, the diffraction efficiency of each order is assumed to be 100%, and hence, it is necessary to reconstruct a PSF affected by diffraction efficiency. In this paper, the PSF model of the visible broadband affected by diffraction efficiency is constructed in three steps. Firstly, the energy distribution of a certain characteristic wavelength in a certain analysis level needs to be constructed. Secondly, the energy distribution of the wavelength in all analysis levels needs to be calculated and superimposed. Thirdly, the energy distribution of all characteristic wavelengths is obtained according to the method of the first two steps. The obtained energy distribution is superimposed with the quantum efficiency of the detector by weight and then normalized, and thus, the PSFs of the R, G, and B channels are obtained. After the PSF model is deconvolved with the grayscale images of the three channels of the blurred image, the three grayscale images obtained are recombined to obtain a clear color image free from the influence of diffraction efficiency.

**Results and Discussions** Firstly, the existing patent optical system (Table 2) is optimized and adjusted, and a single-layer diffractive element is introduced. Without considering the diffraction efficiency, the image quality remains unchanged (Fig. 5 and Fig. 7), while the band range is expanded from 486.1–656.3 nm to 400.0–800.0 nm, and the number of lenses is reduced from six to four (Fig. 6). Then, the R, G, and B three-channel PSF model of the optimized system affected by diffraction efficiency is constructed according to the previous method (Figs. 8–10). The Richardson-Lucy algorithm and the constructed PSF model are used to deconvolute the three-channel grayscale images of the simulated image. After that, the restored grayscale images (Fig. 12) are combined to obtain a restored color image (Fig. 11). The grayscale mean gradient (GMG) function and the blind image quality index (BIQI) function are employed to evaluate the images before and after restoration (Table 3). The BIQI value of the R-channel grayscale image decreases by 5.00%, and the GMG value increases by 51.61% after restoration. The BIQI value of the G-channel grayscale image decreases by 5.44%, and the GMG value increases by 24.28% after restoration. The BIQI value of the B-channel grayscale image decreases by 1.23%, and the GMG value increases by 48.79% after restoration. The effectiveness of this method is proven by the evaluation results.

**Conclusions** The design method in this paper can effectively improve the visible broadband imaging quality of the optical system with a single-layer diffractive optical element. The image obtained by restoration with the PSF model and the unrestored image are evaluated, and the evaluation results are as follows. Subjectively, the image quality after restoration is significantly improved as the image is clearer and has higher contrast. Objectively, the GMG function and the BIQI function are used for evaluation. The GMG evaluation value of the restored image increases by 40.33%, and the BIQI evaluation value decreases by 4.30%, which all indicate that the image quality after restoration is better. The simulations show that this method can be used in the design of a system with a single-layer diffractive element in the visible broadband.

**Key words** optical design; point spread function; diffraction efficiency; computational imaging