

红外双波段衍射混合光学-数字联合系统设计

胡洋, 崔庆丰*, 孙林, 张博, 朴明旭

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 传统单层衍射元件的衍射效率在入射波长偏离中心波长时急剧下降,因此在宽波段红外系统中应用时会导致成像模糊。通过分析视场对含衍射元件系统点扩散函数(PSF)模型的影响,提出了减小视场影响的联合设计方法;该方法通过将优化的权重赋予不同的衍射级次,使系统的 PSF 不随视场变化,同时将单层衍射元件中心波长设计在中波,在长波波段利用所构建的 PSF 模型通过图像重建达到双波段成像的目的。采用该方法设计了红外双波段衍射混合系统,在中波波段,该系统在 17 lp/mm 处的 MTF 为 0.7;长波重建图像在主观上明显清晰,多个图像质量评价函数均有所提高。结果表明,该设计方法可以实现单层衍射元件在红外双波段上的应用。

关键词 光学设计; 衍射效率; 点扩散函数; 联合设计; 红外双波段

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1422002

Optical-Digital Joint Design of a Dual-Waveband Infrared Refractive-Diffractive System

Hu Yang, Cui Qingfeng*, Sun Lin, Zhang Bo, Piao Mingxu

School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The diffraction efficiency of the traditional single-layer diffractive optical elements (SLDOEs) decreases drastically when the wavelength deviates from the center wavelength, causing image blurring when the elements are used in a wide-waveband infrared system. In this study, we analyze the influence of the field of view on the point spread function (PSF) model of the system containing diffractive optical elements. In addition, we propose an optical-digital joint design method for reducing the influence of the field of view. In this method, the PSF is constant with respect to the field of view by assigning optimization weights to different diffractive orders. Further, the center wavelength of the SLDOE is designed in the medium waveband. The PSF model is used for reconstructing the blurred image in the long waveband to achieve dual-waveband imaging. A dual-waveband infrared refractive-diffractive system is designed using this method. The MTF with respect to the medium waveband at 17 lp/mm is 0.7. The reconstructed image in the long waveband is subjectively clear, and several image quality assessment function values are improved. Results show that the proposed design method enables the application of SLDOEs in dual-waveband infrared systems.

Key words optical design; diffraction efficiency; point spread function; joint design; dual-waveband infrared

OCIS codes 220.3620; 050.1970; 110.3080

1 引 言

中波、长波双波段红外成像系统能够在同一个光学系统中观察不同类型的目标,而且能够获得比单波段成像系统更多的目标信息,在识别真伪、反隐身、多目标跟踪等方面具有突出优势^[1-4]。但是,对于双波段成像系统而言,可用的材料较少,波段范围

较宽,光学系统色差校正需要使用复杂的结构,从而限制了它的应用。衍射元件(DOE)以其独特的光学特性被广泛应用于各类光学系统中,尤其是在双波段红外光学系统设计中,衍射元件的引入不仅可以校正此类系统的色差与部分其他像差,还可以简化系统结构,减轻系统的重量^[5-8]。对于传统的单层衍射元件,当波段范围变宽时,非中心波长处的衍射

收稿日期: 2020-03-19; 修回日期: 2020-04-02; 录用日期: 2020-04-28

基金项目: 国家重大科技专项高分专项(51-H34D01-8358-13/16)、长春理工大学青年科学基金(XQNJJ-2017-09)

* E-mail: qf_cui@163.com

效率就会急剧下降,从而使得折衍混合系统在高衍射效率波段的成像效果良好,而在低衍射效率波段处成像模糊。这是传统单层衍射元件在双波段系统应用中的一大障碍。

为了提高宽波段衍射元件的衍射效率,文献[9]提出了使用双层衍射元件来提高红外宽波段衍射效率的方案,并设计、制作了双层衍射元件;将该元件应用于红外宽波段系统后发现,该系统在红外宽波段达到了较高的衍射效率。文献[10]提出了采用多层衍射元件实现高衍射效率的双波段设计方法,根据此方法设计出的多层衍射元件在双波段均达到了高的衍射效率,满足清晰成像的要求。文献[11]采用双层衍射光学元件完成了双波段红外光学系统的设计,该设计不仅实现了较大的带宽积分衍射效率,还简化了系统结构。但是,与单层衍射元件相比,双层或者多层衍射元件的入射角较小,结构、工艺都较为复杂。近年来,计算成像^[12-15]作为一项新兴技术,被越来越多地用来解决现有的应用难题。文献[16]提出使用轻量化的折衍光学元件设计全可见光波段成像系统,并针对严重的色差进行了计算成像,得到了较好的成像结果。文献[17]采用光学-数字联合设计方法设计长焦距望远系统,将色差的校正负担转移到软件上,简化了此类系统的结构。文献[18]提出了受衍射效率影响的系统点扩散函数(PSF)模型,并用此模型复原了受衍射效率影响而模糊的图像,证明了该模型的可行性;但是该研究针对的是小视场范围,且仅对轴上模型进行了分析。

本文分析了视场对含衍射元件系统的 PSF 模型的影响,并提出了减小视场影响的“光学-数字联合”系统的设计方法。该方法在保证主衍射级次成像质量的前提下,通过赋予其余衍射级次不同的权重进行光学优化,使系统的 PSF 不随视场变化,简化了图像的重建难度。此外,本文基于该方法设计了双波段红外光学系统。设计结果表明:在像质不变的前提下,该方法不仅可以减小视场对系统 PSF 模型一致性的影响,结合图像复原后还可以以单层衍射元件实现双波段红外光学系统的设计。

2 基本原理

2.1 设计原理

在信息论中,成像图像 $g(x, y)$ 是由清晰图像 $f(x, y)$ 与光学系统 PSF 卷积之后再与噪声 n 进行加和得到的,即

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes \text{PSF}(x, y) + n. \quad (1)$$

PSF 是一点光源通过光学系统后的光场分布,是后期图像复原的恢复模型。常用的光学设计软件(如 Zemax、Code V 等)都可直接给出光学系统的 PSF;但对于衍射元件,常用的设计软件通常会忽略其衍射效率的影响,认为它的衍射效率在各波长、给定衍射级次下都为 100%。因此,折衍混合成像系统需要重新计算构建 PSF 模型。在设计双波段红外系统时,会将单层衍射元件的中心波长设计在中波,这样,整个中波波段就可以保持较高的衍射效率,探测器可以直接成清晰像^[19]。而长波波段由于偏离了中心波长,衍射效率急剧下降,导致探测器成像模糊。根据(1)式,当已知受衍射效率影响的 PSF 模型后,便可以通过算法逆向重建清晰像,从而达到两个波段均可以清晰成像的目的。

2.2 PSF 模型的构建

现有研究已经给出了含衍射元件的 PSF 模型的构建方法。PSF 模型的构建分为三步:

第一步,求取单一特征波长在 m 级次的能量分布 $P(\lambda, m)$ 。假设该特征波长的一级衍射效率为 $\eta_1(\lambda)$,一级衍射光线会聚于像面上的一点,该波长非一级衍射光线在像面上形成半径为 $R(\lambda, m)$ 的弥散斑,弥散斑内的能量为该级次的衍射效率 $\eta_m(\lambda)$,将衍射能量平均分配在弥散斑内,就可得到该波长在某一级次的能量分布 $P(\lambda, m)$ 。

第二步,按照第一步的方法求取单一特征波长在所有分析级次的能量分布,进行叠加便可以得到单一特征波长的能量分布 $\text{PSF}(\lambda)$ 。

第三步,按照第一、第二步的方法求出所有特征波长在所有分析级次的能量分布 $\text{PSF}(\lambda)$,其中,特征波长的划分与弥散半径 $R(\lambda, m)$ 、探测器像元尺寸 S 有关;然后求出特征波长的权重系数 ω_λ ,将不同波长的 $\text{PSF}(\lambda)$ 按照不同的权重进行叠加,并进行归一化处理,就可以得到整个分析波段内所有分析级次的 PSF 模型 PSF_{DOE} ^[18],即:

$$\text{PSF}_{\text{DOE}} = \frac{\sum_{\lambda} \omega_{\lambda} \text{PSF}(\lambda)}{\sum_{\lambda} \sum_m \eta_m(\lambda)}. \quad (2)$$

需要指出的,该模型只是针对轴上视场进行研究的,而实际的光学系统并不只有轴上视场,所以研究视场对模型的影响也是很重要的。由于目前的双波段红外探测器大多为制冷探测器,所以本文基于制冷红外系统光阑后置的情况分析视场对 PSF 模型的影响。

当光通过单层衍射元件后,光被衍射至不同的

衍射级次,不同的衍射级次有不同的焦点,衍射效率反映了各个级次衍射能量的大小。在光学设计中,通常仅设计一级衍射,将衍射能量设计会聚于第一级次。对于双波段系统,单层衍射元件的衍射效率特性使得仅有一个波段达到较高的一级衍射效率,而另一波段的一级衍射效率较低,光线被衍射至其他级次,也就是说这些光线在其他级次的焦点处被再次聚焦。通过计算不同衍射级次的焦距,就可以得到其余衍射级次的焦面。

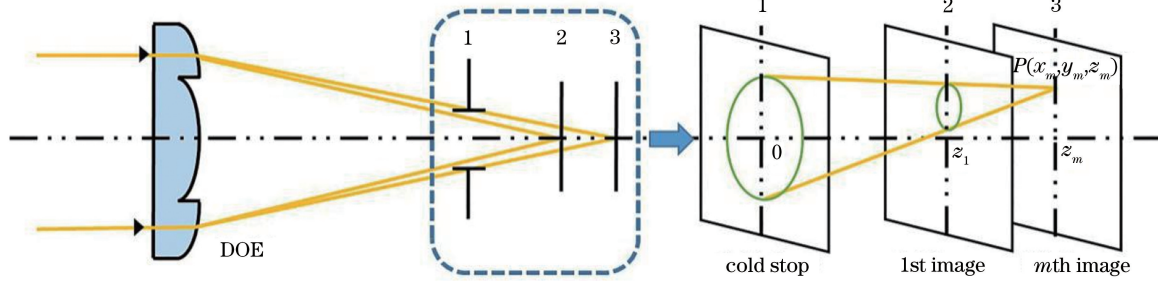


图 1 模型分析原理图

Fig. 1 Model analysis principle

上述圆锥的准线方程为

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R_{\text{stop}}^2, \\ z = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: R_{stop} 为冷光阑的半径。

通过定点 P 及准线上的一点 $A(A_x, A_y, A_z)$, 可以得到锥面母线方程为

$$\frac{x - x_m}{A_x - x_m} = \frac{y - y_m}{A_y - y_m} = \frac{z - z_m}{A_z - z_m} \quad (4)$$

将 A 点坐标用 x, y, z 表示, 并代入准线方程可得到该锥面方程为

$$\left[x_m - \frac{(x - x_m)z_m}{(z - z_m)} \right]^2 + \left[y_m - \frac{(y - y_m)z_m}{(z - z_m)} \right]^2 = R_{\text{stop}}^2 \quad (5)$$

则像面与该锥面的交面即为弥散斑的面型方程, 即

$$\begin{cases} \left[x_m - \frac{(x - x_m)z_m}{(z - z_m)} \right]^2 + \left[y_m - \frac{(y - y_m)z_m}{(z - z_m)} \right]^2 = R_{\text{stop}}^2, \\ z = z_1 \end{cases} \quad (6)$$

化简后为

$$\left(x - \frac{x_m z_1}{z_m} \right)^2 + \left(y - \frac{y_m z_1}{z_m} \right)^2 = \left(\frac{z_1 - z_m}{z_m} R_{\text{stop}} \right)^2 \quad (7)$$

由(7)式可知, 该方程为圆的标准方程, 且半径仅与 $z_1, z_m, R_{\text{stop}}$ 有关。可以看出, 在一个级次上, 不论基点坐标如何选取, 其在像面上的弥散斑始终

如图 1 所示, 构建坐标系, 以冷光阑为 z 方向坐标原点, 光阑面则为 $(x, y, 0)$, 光学系统像面为 (x, y, z_1) , m 级次衍射焦面为 (x, y, z_m) 。当光被衍射至非第一级次时, 就会在像面上形成一个弥散斑; 以非成像级次上的一点 $P(x_m, y_m, z_m)$ 为基点, 以冷光阑为准线, 向光阑圆形口径投射出一圆锥, 该圆锥面在像面上的投影形状即为该级次光在像面上形成的弥散斑的形状。通过求取圆锥面的方程并联立像面方程, 便可求得弥散斑的表达式。

为圆形, 且半径相同。这一特性十分有利于后期的图像重建。图像重建的难点之一在于 PSF 的获取。一般情况下, PSF 会随视场的改变而发生变化, 这种变化通常是没有特定规律的, 若要复原此类图像就需使用空间变化的图像复原方法。空间变化的图像的复原过程较为复杂。然而, 通过以上分析可以看出, 衍射 PSF 模型并不受视场的影响, 在不同的视场中 PSF 具有一致性。也就是说, 上述方法是一种空间不变的图像复原, 该方法在后期图像重建中具有较大优势, 且重建过程较为简单。

2.3 光学设计

单层衍射元件将偏离中心波长的光衍射至不同的级次, 将衍射面置于系统的最后一个表面上有利于分析衍射光的衍射分布, 也便于后续 PSF 模型的构建。若将衍射面置于其他表面, 则衍射光就会受镜筒、孔径等的影响, 其能量分布较难计算, 且没有规律, 所以在光学设计时需将衍射面置于系统最后一个表面上。

以下针对采用传统方法设计的 10° 视场的系统进行分析。将衍射级次设为非设计级次, 像面上的弥散斑在视场较大时并不是标准的圆形。这是因为在建模分析时, 假设在其余级次上的成像均为一个理想的像点, 然而在实际设计过程中仅仅通过优化使像面得到较好的成像质量, 在其余级次上并不能得到良好的成像质量, 所以像面上的弥散斑并不是

理想的圆形,从而导致各视场上的弥散斑不具有-致性。此类系统的复原为空间变化的图像的复原,相较于空间不变的图像的复原更加复杂,耗时更长^[20-21]。所以,本文提出了一种设计方法,即在优化过程中,在保证像面成像质量的前提下,给予其余衍射级次一定的优化权重。也就是说,保证在其余级次上也能够达到一个较好的成像质量,以此来保证像面上不同视场的弥散斑能够具有一致性。这样就可以将原本的空间变化的复原问题简化为空间不变的复原问题,从而极大地简化后续图像重建的难度。为此,本文给出了一个光学优化函数,即

$$M^2 = \frac{W_1(V_1 - T_1)^2 + \sum W_m(V_m - T_m)^2}{W_1 + \sum W_m}, \quad (8)$$

$W_1 > W_m,$

式中: W_1 为一级衍射的优化权重; W_m 为 m 级衍射的优化权重; V_1 为一级衍射优化的当前值; V_m 为 m 级衍射优化的当前值; T_1 为一级衍射优化的目标

值; T_m 为 m 级衍射优化的目标值。

2.4 衍射光学元件的设计

以下针对红外中波、长波双波段衍射效率曲线进行分析。分别计算中心波长在中波和长波下的衍射效率曲线。

从图 2(a)中可以看出,当中心波长设在长波时,一级衍射效率在中波波带几乎降为 0。由于像面是基于一级衍射设计的,所以图像难以重建。从图 2(b)中可以看出,当中心波长在中波时,一级衍射效率在长波波带仍能保持一定的数值。这说明,在这种情况下,图像具有一定的对比度,可以进行图像的重建。所以提出了该类系统衍射元件的设计方法:将衍射元件中心波长设置在中波波带,中心波长的选择是使中波波带的带宽积分衍射效率达到最大。即:保证在中波波带通过衍射元件本身就可以直接在探测器上成清晰像,同时在长波波带的一级衍射效率仍能保持一定的值,以用于后续的图像重建。

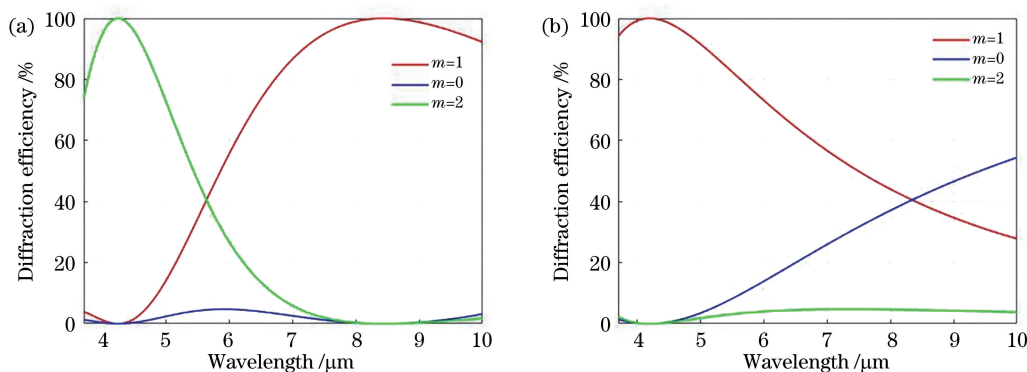


图 2 衍射效率图。(a)中心波长为长波时;(b)中心波长为中波时

Fig. 2 Diffraction efficiency. (a) When the center wavelength is in long waveband;
(b) when the center wavelength is in medium waveband

3 设计实例

本文基于一款像元尺寸为 $30 \mu\text{m}$ 、面阵规格为 320×256 的制冷红外探测器设计了一个双波段红外光学系统,该系统的工作波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 和 $7.7 \sim 10 \mu\text{m}$,具体参数如表 1 所示。

表 1 系统指标

Table 1 Design specifications of designed system

Parameter	Value
Wavelength / μm	3.7-4.8 and 7.7-10
Field of view / ($^\circ$)	14.4
Effective focal length / mm	50
F number	2

采用传统方法在不考虑衍射效率的条件下得到了两个波段的 MTF,如图 3 所示,可见:中波 MTF 在 17 lp/mm 处大于 0.7,长波 MTF 在 17 lp/mm 处大于 0.5,像差得到了校正。

由衍射效率曲线可知,光线除了被衍射至成像级次外,大多被衍射至了 0 级次,所以这里分析 0 级次在像面上的弥散斑。0 级次衍射在像面上的弥散斑如图 4 所示,可以看出,当视场较大时,各视场上的弥散斑不具有较好的一致性。

采用本文提出的优化方法对 0 级次衍射成像进行相应的权重优化,相对权重为 0.8。优化后的光学系统为五片式结构(一片锗,一片硫化锌,三片硒化锌),光阑位于光学系统后端,最后一面为衍射面,其余均为球面,如图 5 所示。

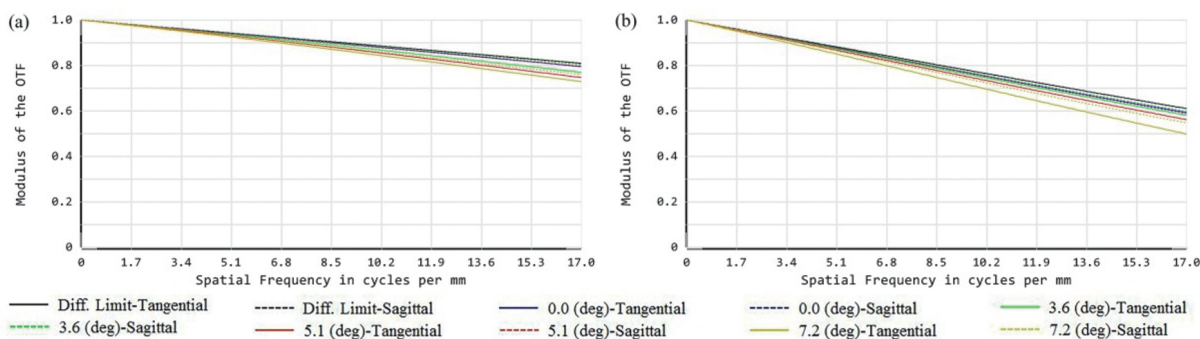


图 3 传统设计方法得到的 MTF 曲线。(a)中波红外 MTF 曲线;(b)长波红外 MTF 曲线

Fig. 3 MTF graphs of traditional design method. (a) MTF of medium wave infrared; (b) MTF of long wave infrared

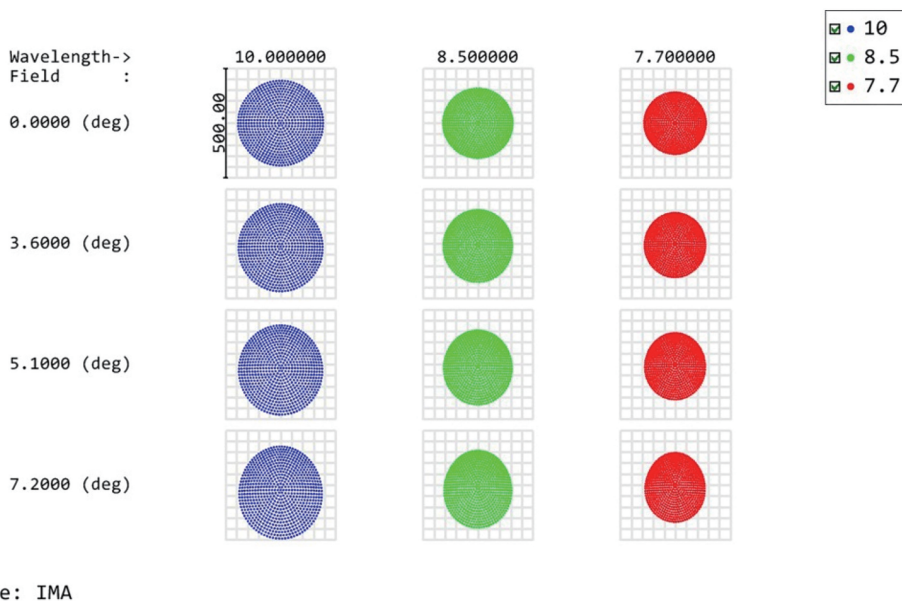


图 4 传统设计方法得到的弥散斑

Fig. 4 Spot diagram obtained by traditional design method

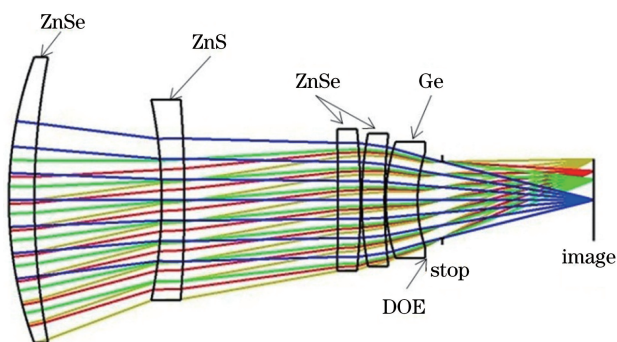


图 5 本文设计的光学系统结构图

Fig. 5 Optical system layout of proposed design method

在不考虑衍射效率时,系统的 MTF 如图 6 所示,中波 MTF 在 17 lp/mm 处大于 0.7,长波 MTF 在 17 lp/mm 处大于 0.5,与传统方法设计的系统的成像质量相同。

0 级次衍射在像面上的弥散斑如图 7 所示。从

图 7 中可以看出,当视场较大时,0 级次衍射光线在像面上的弥散斑并没有太大变化。

此外,本文还计算了传统设计方法和本文所提设计方法得到的弥散斑的均方根半径,并计算了各个视场均方根半径的方差值,如表 2 所示。从表 2 中可以看出,对于各视场,本文所提方法在三个波长 (7.7, 8.5, 10.0 μm) 下得到的弥散斑的均方根半径的方差与传统方法相比,分别下降了 93.66%、91.96%、66.34%。这在客观上证明了本文所提优化方法可以在各视场下提高弥散斑的一致性,可以更好地将空间变化的复原问题简化为空间不变的复原问题,从而使得使用一个 PSF 模型即可处理整个长波图像。

4 结果与分析

单层衍射元件在中波波段可以达到较高的衍射

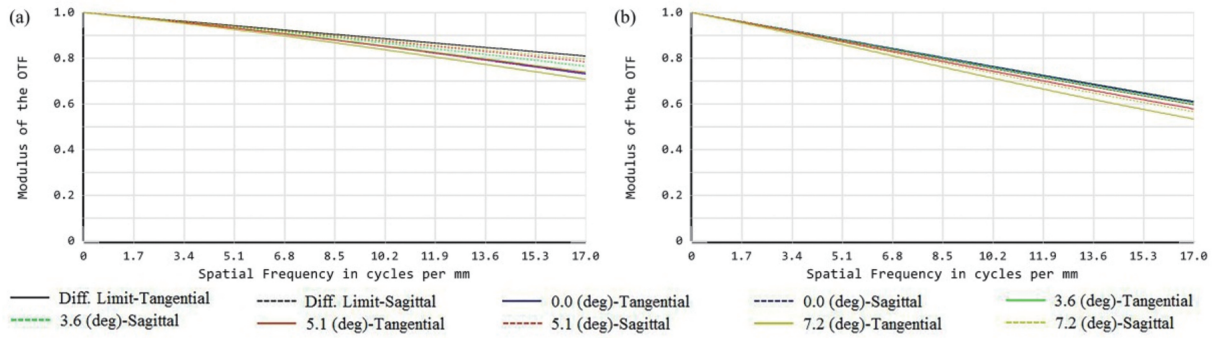
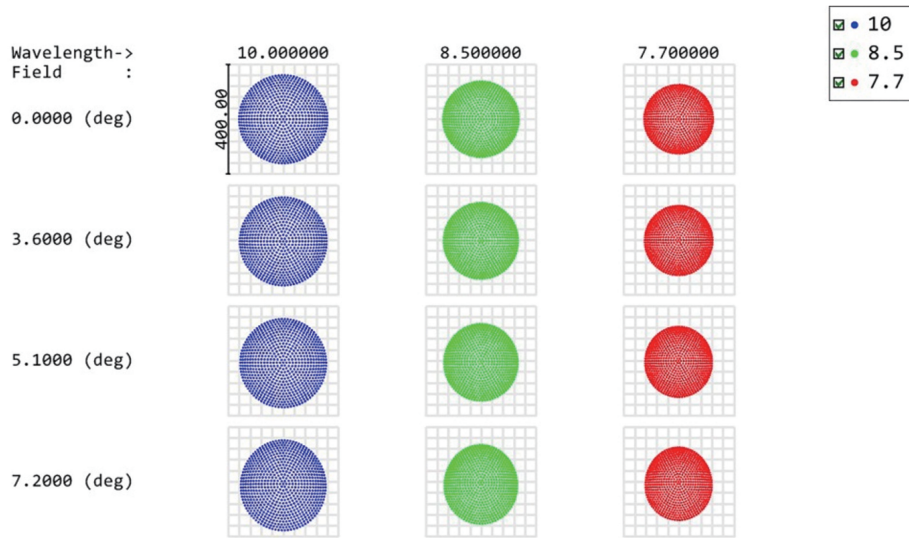


图 6 本文设计方法得到的 MTF 曲线。(a)中波红外 MTF 曲线;(b)长波红外 MTF 曲线

Fig. 6 MTF graphs of proposed design method. (a) MTF of medium wave infrared; (b) MTF of long wave infrared



Surface: IMA

图 7 本文设计方法得到的像面弥散斑

Fig. 7 Spot diagram of proposed design method

表 2 两种优化方法得到的弥散斑的均方根半径及方差

Table 2 Blurred spot root-mean-square radius and variance obtained by two optimization methods

Field of view / (°)	Root-mean-square radius / μm					
	Wavelength of 7.7 μm		Wavelength of 8.5 μm		Wavelength of 10.0 μm	
	Traditional	Proposed	Traditional	Proposed	Traditional	Proposed
0	108.59	98.81	121.51	107.76	148.52	125.64
3.6	109.91	98.11	122.76	106.89	149.58	124.36
5.1	111.18	97.90	123.99	106.51	150.72	123.59
7.2	112.96	98.81	125.81	107.09	152.59	123.42
Variance	3.47	0.22	3.36	0.27	3.03	1.02

效率,所以可以直接使用 MTF 对中波红外成像进行评价。通过以上分析可知,该系统可以在中波红外达到较高的成像质量。本文使用软件在长波范围进行成像模拟及图像重建,图像重建使用 Richardson-Lucy 算法^[22],得到的结果如图 8 所示。

本文主要采用主观评价和客观评价这两种方法对最终得到的图像进行评价。主观评价主要是根据人的主观看法对图片进行评价,客观评价主要是利用评价函数进行评价。本文分别使用灰度平均梯度像质评价法(GMG)、拉普拉斯能量和模型(LS)^[23]

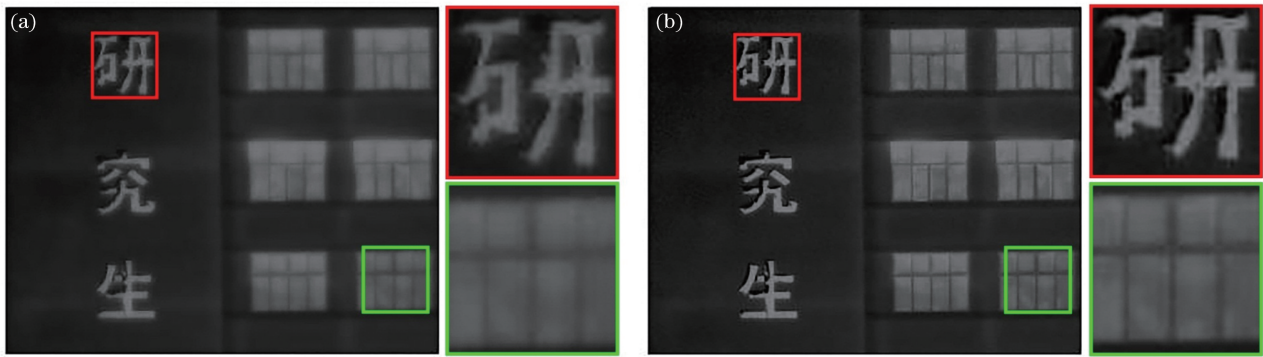


图 8 重建结果图。(a)未处理图像;(b)重建后图像

Fig. 8 Reconstruction results. (a) Unprocessed image; (b) reconstructed image

以及基于两级框架的无参考图像质量评价模型(BIQI)^[24]对图像进行客观评价。在本文所采用的评价函数中,BIQI的函数值越低,图像质量越好;而GMG和LS的函数值越高,图像质量越好。

从主观方面分析:清晰景物经过此光学系统后,由于在长波段的衍射效率较低,故而图像模糊,如图8(a)所示;经过分析处理后,图像明显清晰,如图8(b)所示。在图8中,右侧图像为左侧图像的局部放大。从局部放大图像中更容易地看出,本来模糊的线条,经过处理后,对比度明显提高,高频部分得到加强。

对重建前后的图像使用以上评价函数进行比较,结果如表3所示。从表3中计算得到的数据可以看出:模糊图像的BIQI函数值较大,复原后较小,下降了13.66%;模糊图像的GMG、LS函数值较小,复原后较大,分别提升了88.88%与123.32%。这就在客观上证明了本文提所提方法可以提升图像质量。

表 3 客观评价函数值

Table 3 Objective assessment function value

Image	GMG	LS	BIQI
Blurred image	1.7367	6.5322	64.2197
Restored image	3.2802	14.5878	55.4468

5 结 论

针对单层衍射元件在远离中心波长时,因衍射效率低而导致成像模糊的问题,本文提出了光学-数字联合设计方法。该方法将单层衍射元件的中心波长设置在中波范围,在长波波段通过所构建的PSF模型进行图像重建。通过分析视场对含衍射元件的PSF模型的影响,提出了减小视场对复原影响的设计方法。即:在保证主衍射级次成像质量的前提下,

通过赋予其余衍射级次不同的权重,进行光学优化,从而使系统的PSF不随视场变化,简化了图像的重建难度。

当不考虑衍射效率时,在中波、长波两个波段下,采用所提方法设计的双波段红外系统在17 lp/mm处的MTF分别大于0.7与0.5,与传统设计方法得到的结果相同,且各视场的弥散斑具有一致性。长波图像通过所构建的PSF模型复原后,主观评价结果为图像明显清晰;客观评价函数GMG、LS分别提升了88.88%与123.32%,BIQI函数下降了13.66%。采用本文所提方法,可将单层衍射元件用于双波段红外光学系统的设计。

参 考 文 献

- [1] Wood A P, Rogers P J, Conway P B, et al. Hybrid optics in dual-waveband infrared systems [J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3482: 602-613.
- [2] Adomeit U, Ebert R. Improved target detection by IR dual-band image fusion[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7481: 74810B.
- [3] Vizgaitis J N. Optical concepts for dual band infrared continuous zoom lenses [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7652: 76522E.
- [4] Vizgaitis J N, Hastings A R, Jr. Dual band infrared picture-in-picture systems [J]. Optical Engineering, 2013, 52(6): 061306.
- [5] Riedl M J. Design example for the use of hybrid optical elements in the infrared[J]. Applied Optics, 1996, 35(34): 6833-6834.
- [6] 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.
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.

- [7] Mao S, Zhao J L. Optimal design for multi-layer diffractive optical elements with antireflection films [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0305001.
毛珊, 赵建林. 镀有增透膜的多层衍射光学元件的优化设计方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0305001.
- [8] Yang L L, Liu C L, Zhao Y B, et al. Effect of microstructure height error on diffraction efficiency at oblique incidence in a certain temperature range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0405001.
杨亮亮, 刘成林, 赵勇兵, 等. 斜入射时一定温度范围内微结构高度误差对衍射效率的影响[J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0405001.
- [9] Wood A, Lee M S, Cassette S. Infrared hybrid optics with high broadband efficiency [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5874: 58740G.
- [10] Xue C X, Cui Q F, Liu T, et al. Optimal design of a multilayer diffractive optical element for dual wavebands [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(24): 4157-4159.
- [11] Mao W F, Zhang X, Qu H M, et al. Broad dual-band kinoform infrared double-layer diffractive optical system design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1022002.
毛文峰, 张新, 曲贺盟, 等. 红外双色宽波段高衍射效率衍射光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1022002.
- [12] Mait J N, Euliss G W, Athale R A. Computational imaging [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2018, 10(2): 409-483.
- [13] Tan Z, Xiangli B, Lü Q B, et al. Optics/digital processing co-design method based on aberration optional-correcting [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(5): 0511001.
谭政, 相里斌, 吕群波, 等. 基于像差选择性校正的光学-数字联合设计[J]. *光子学报*, 2018, 47(5): 0511001.
- [14] Dong Y, Chen Y T, Feng H J, et al. Scene fusion system based on ambient light detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(1): 0110001.
董月, 陈跃庭, 冯华君, 等. 基于环境光检测的场景融合系统[J]. *光子学报*, 2020, 49(1): 0110001.
- [15] Wang F, Wang H, Bian Y M, et al. Applications of deep learning in computational imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111002.
王飞, 王昊, 卞耀明, 等. 深度学习在计算成像中的应用[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111002.
- [16] Peng Y F, Fu Q, Amata H, et al. Computational imaging using lightweight diffractive-refractive optics [J]. *Optics Express*, 2015, 23(24): 31393-31407.
- [17] Zhang J G, Nie Y F, Fu Q, et al. Optical-digital joint design of refractive telescope using chromatic priors [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(5): 052201.
- [18] 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.
- [19] Riedl M J. *Optical design fundamentals for infrared systems, second edition* [M]. Bellingham: The International Society for Optical Engineering, 2001.
- [20] Tao X P, Feng H J, Lei H, et al. A splicing method of sectioned restoration algorithm for images with space-variant point spread function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 648-653.
陶小平, 冯华君, 雷华, 等. 一种空间变化 PSF 图像分块复原的拼接方法[J]. *光学学报*, 2009, 29(3): 648-653.
- [21] Costello T P, Mikhael W B. Efficient restoration of space-variant blurs from physical optics by sectioning with modified Wiener filtering [J]. *Digital Signal Processing*, 2003, 13(1): 1-22.
- [22] Fish D A, Walker J G, Brinicombe A M, et al. Blind deconvolution by means of the Richardson-Lucy algorithm [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(1): 58-65.
- [23] 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.
- [24] 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.