

拼接式光学窗口对光学系统影响的分析方法

邢振冲^{1,2} 张 葆¹ 洪永丰¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 高速飞行器采用拼接式光学窗口可以减小风阻和雷达波反射,但是会引起入射波前在窗口处被各个拼接玻璃分割,可能会导致光学系统调制传递函数(MTF)降质以及点扩展函数(PSF)的下降和劈裂,严重的情况下会影响系统的分辨率。因此,分析拼接式光学窗口对光学系统的影响对设计采用拼接窗口的光学系统有着重要参考价值。利用Zemax软件构建拼接窗口模型,简化拼接窗口分析过程,得出不同情况下拼接窗口波前分割后的MTF和PSF,结果表明,当被分割的入射光产生特定的光程差时会使MTF和PSF发生严重下降和劈裂,PSF发生严重劈裂的系统会使光学系统成像质量下降。拼接窗口参数的合理选择可以降低这种影响。

关键词 成像系统; 光学窗口; 调制传递函数; 点扩展函数

中图分类号 TP702 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1022005

Analysis Method of the Effect of Stitched Windows on the Optical Systems

Xing Zhenchong^{1,2} Zhang Bao¹ Hong Yongfeng¹

¹Changchun Institute of Optical, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract High-speed aircrafts which use splicing optical windows can reduce the drag and radar reflectivity. But they will cause the incident wave at the front of the various window glass splited, and may cause the degradation of the optical system modulation transfer function (MTF) and the decline and splitting of the point spread function (PSF). In severe cases it will affect the resolution of the system. Therefore, analysis of the effect of stitched windows on the optical systems has an important reference value to the optical system design using stitched windows. Use Zemax software to build stitched window model, we simplify the process of the analysis. The results show that when the incident light is divided to produce a specific optical path difference, the MTF and PSF will decline and split. The serious split of the PSF will decrease the image quality of the optical system. Reasonable choice to the stitched window parameter can mitigate this effect.

Key words imaging systems; optical window; modulation transfer function; point spread function

OCIS codes 110.4850; 220.4830; 050.1970; 080.1665

1 引 言

航空相机在高空对地面景物成像,所处的环境条件十分复杂,为了保证相机有一个相对稳定的温度环境,同时又要保证相机对地面景物成像,要在相机镜头前设置光学窗口,因此光学窗口是其重要部件之一,国内外对其做了很多研究^[1-3]。然而,随着军事对抗技术的发展,比如雷达技术,精确制导技术等,提高隐蔽性和飞行速度就使得飞行器的设计越来越重视隐身设计和空气动力学,特别是采用共形设计实现有效的隐身,这种设计理念使得拼接式光学窗口得以发展。特别是随着“狙击手”吊舱和F-35光电瞄准吊舱等一些采

收稿日期: 2015-03-30; 收到修改稿日期: 2015-05-25

基金项目: 中科院长春光机所重大创新资助项目(Y3CX1SS14C)、中科院航空成像与测量重点实验室开放基金(Y3HC1SR1414)

作者简介: 邢振冲(1991—),男,硕士研究生,主要从事光学设计方面研究。E-mail: chong091010123@163.com

导师简介: 张 葆(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事航空光电成像技术方面的研究。E-mail: cleresky@vip.sina.com

用拼接窗口的吊舱的不断涌现^[4],近些年飞行器光电平台的光学窗口设计越来越趋向这种窗口设计,比如我国歼-20。当采用拼接式光学窗口时,入瞳处的入射波前被分割成几块,且随着光学窗口之后光学系统探测目标时不断转动,块与块之间的光线会产生不断变化的光程差(OPD),对于单色光或者当OPD小于光线的相干长度时的非单色光会发生干涉,进而导致系统的调制传递函数(MTF)和衍射受限系统点扩散函数(PSF)的变化,从而导致图像的退化^[5-6]。

本文讨论了两块和三块式拼接光学窗口,仅限于由于拼接窗口的波前分割造成块间不同的衍射效应,导致系统光学传递函数的严重降低和截止频率的减小的情况。不同于国外利用CODEV分析方法^[7],本文利用Zemax软件定义多边形功能(POB)构建拼接窗口仿真模型,通过模拟相干和非相干入射光通过模型后产生各种情况下的MTF和PSF,分析拼接窗口对光学系统的影响。

2 理论分析

2.1 基本理论

F-35的光电跟踪系统(EOTS)光学窗口为共形设计拼接窗口的典型代表,如图1所示,成像系统绕内部固定轴旋转过程中,途径多块窗口。在某一特定扫描角位置,入瞳处的入射波前必定同时穿过两块或多块拼接窗口,分别如图2和图3所示。当拼接窗口夹角为120°时,如图4所示,入射光线倾斜入射到窗口处,两块玻璃的波前入射角分别为 α 和 $A-\alpha$,当 $\alpha \neq 30^\circ$ 时,两角度不相等,此时进入系统的光线便会产生光程差和相位差。

参考图4,假设玻璃厚度相等,仅考虑因为入射角度不同而引起的OPD不同的情况。入射波前在两块玻



图1 EOTS共形窗口

Fig.1 Conformal optical window of EOTS

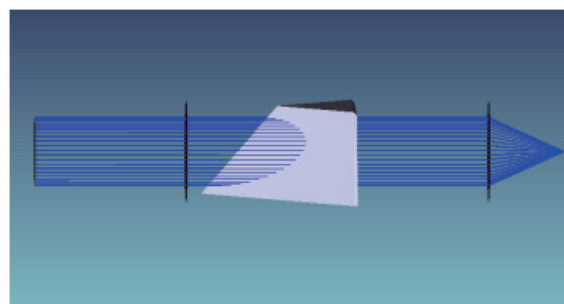


图2 入瞳处的入射波前同时通过两块玻璃

Fig.2 Incident lights go through two glasses at the same time

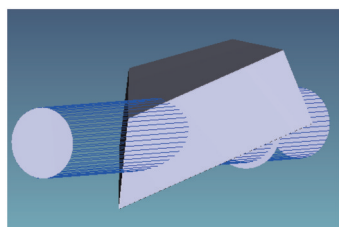


图3 入瞳处的入射波前同时通过三块玻璃

Fig.3 Incident lights go through three glasses at the same time

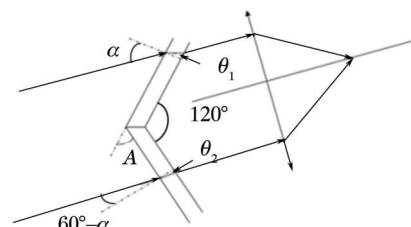


图4 不同入射角光线通过两块拼接窗口

Fig.4 Incident lights go through the window at the different incident angles

璃的入射角分别为 α 和 $A-\alpha$, θ_1 和 θ_2 分别为折射角,玻璃折射率为 n ,厚度为 d , D_1 和 D_2 分别为上下光程, ΔD 和 $\Delta\varphi$ 分别为光程差和相位差,则

$$\Delta D = D_1 - D_2 = nd / \cos \theta_2 - nd / \cos \theta_1, \quad (1)$$

$$n \sin \theta_1 = \sin(\alpha), \quad (2)$$

$$n \sin \theta_2 = \sin(A - \alpha).$$

把(2)式代入(1)式可得光程差和相位差分别为:

$$\Delta D = nd \left[1 / \sqrt{1 - \frac{\sin^2(A - \alpha)}{n^2}} - 1 / \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\alpha)}{n^2}} \right], \quad (3)$$

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot \Delta D / \lambda. \quad (4)$$

举例说明,假设光电瞄准系统拼接窗口夹角为 90° , $A=45^\circ$ 红外工作波段为 $8\sim 12\ \mu\text{m}$, $d=2\ \text{mm}$, $n=2.52$,则其相干长度为:

$$l = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1) = \frac{8 \times 12}{12 - 8} = 24\ \mu\text{m} . \quad (5)$$

一般来说,当光程差小于相干长度时,产生干涉,当光程差大于相干长度时,视场内不产生干涉,只是光强的简单相加^[7]。若 $\alpha = 15^\circ$, $45^\circ - \alpha = 30^\circ$,则 $\Delta D = 75\ \mu\text{m}$,大于两个波长;若 $\alpha = 21^\circ$, $45^\circ - \alpha = 24^\circ$,则 $\Delta D = 15.2\ \mu\text{m}$,小于平均波长,因此,总的衍射斑是两个波前干涉的叠加。当波长 $\lambda = 0.587\ \mu\text{m}$, $d=5\ \text{mm}$, $n=1.768234$ (蓝宝石)时,光程差随入射角的变化关系如图5所示,可见,光学系统在摆扫的过程中,入射光通过窗口的光程差不断变化,当 α 关于 $\alpha = 22.5^\circ$ 产生适当小的偏差时,光程差在零附近变化,且满足相干受限,但对于较大的偏差,光程差不满足相干受限,此时为非相干受限。

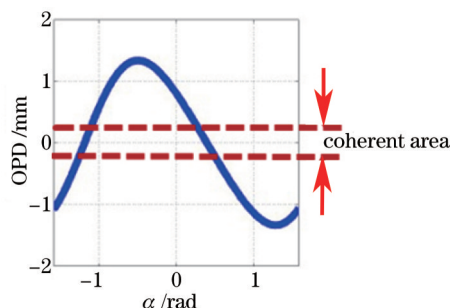


图5 光程差随入射角的变化关系

Fig.5 Diagram of the OPD varies with the incident angle

为了进一步了解拼接窗口对光电瞄准系统的影响,需要得到光学系统的MTF和PSF。对于实际系统,其非相干成像系统的光学传递函数(OTF)为^[8-9]:

$$F_{\text{OTF}} = m(f_x, f_y) \exp[j\phi(f_x, f_y)] , \quad (6)$$

$$m(f_x, f_y) = \frac{|H_i(f_x, f_y)|}{H_i(0, 0)} = \frac{|A_i(f_x, f_y)|}{|A_g(f_x, f_y)|} , \quad (7)$$

$$\phi(f_x, f_y) = \theta_i(f_x, f_y) - \theta_g(f_x, f_y) , \quad (8)$$

式中 $H_i(f_x, f_y)$ 是光强脉冲响应的傅里叶变换,零频成分对应的是 $H_i(0, 0)$ 。 $A_i(f_x, f_y)$, $A_g(f_x, f_y)$ 分别表示输入和输出归一化光强频谱。 $\theta_i(f_x, f_y)$, $\theta_g(f_x, f_y)$ 分别表示输入和输出归一化光强频谱的相位。 $m(f_x, f_y)$ 就是MTF,描述各系统对各频率分量对比度的传递特性。 $\phi(f_x, f_y)$ 则为相位传递函数(PTF),描述系统对各频率分量施加的相移。对于衍射受限系统, P 为系统光瞳函数,光学传递函数如下:

$$F_{\text{OTF}} = \frac{P(f_x, f_y) \otimes P(f_x, f_y)}{\iint_{-\infty}^{\infty} |P(\xi, \eta)|^2 d\xi d\eta} = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} P(\xi, \eta) \cdot P(\xi - f_x, \eta - f_y) d\xi d\eta}{\iint_{-\infty}^{\infty} |P(\xi, \eta)|^2 d\xi d\eta} , \quad (9)$$

式中 \otimes 表示自相关运算从几何角度分析。

理想成像情况下点物成的像为点像,而衍射受限系统受PSF的影响,点物的实际成像范围均受到一定扩散形成弥散斑,点扩散函数表征了该成像系统的分辨本领。2个物点距离小于点扩散函数的范围,2个物点的像就互相重叠,分辨不出2个像点^[10]。PSF和OTF之间存在傅里叶变换的关系:

$$F_{\text{OTF}} = \iint F_{\text{PSF}}(x, y) \exp[-2\pi i(f_x x + f_y y)] dx dy , \quad (10)$$

2.2 单色光入射下的MTF计算

根据Gimlett分割波前计算理论^[11-12],假设两波前在同个衍射受限的入瞳处入射,其相位为 φ_1, φ_2 ,则相位差为:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta D . \quad (11)$$

光瞳函数为:

$$\begin{aligned}
 P(f'_x, f'_y) &= \exp(j\varphi_1), \quad f_x'^2 + f_y'^2 \leq f_0^2, \quad f'_x < 0 \\
 &= \exp(j\varphi_2), \quad f_x'^2 + f_y'^2 \leq f_0^2, \quad f'_x < 0, \\
 &= 0, \quad f_x'^2 + f_y'^2 \geq f_0^2
 \end{aligned} \tag{12}$$

式中 $f_0 = 1/2\lambda F^\#$, $F^\#$ 为系统 F 数。理想透镜的单色光 MTF 为:

$$M_0(f) = 2/\pi \left[\cos^{-1}(f/2f_0) - f/2f_0 \sqrt{1 - (f/2f_0)^2} \right], \quad f \leq 2f_0. \tag{13}$$

则将(12)式代入(9)式后,对于子午方向,波前边界处的 OTF 为

$$\begin{aligned}
 F_{\text{OTF}}(f_x, 0) &= M_0(2f_x) + [M_0(f_x) - M(2f_x)] \cdot \exp[j(\varphi_2 - \varphi_1)], \quad 0 \leq |f_x/2f_0| \leq 1/2 \\
 &= M_0(f_x) \cdot \exp[j(\varphi_2 - \varphi_1)], \quad 1/2 \leq |f_x/2f_0| \leq 1, \\
 &= 0, \quad |f_x/2f_0| > 1
 \end{aligned} \tag{14}$$

式中 f_0 为相干截止频率, $2f_0$ 为非相干截止频率。由(14)式可以看出,在单色光例子中,当 $1/2 \leq |f_x/2f_0| \leq 1$ 时,OTF 的模就是 MTF,由于 $\exp[j(\varphi_2 - \varphi_1)]$ 的存在,系统会存在相移。因此系统对正弦分布图案成像时,将会产生横向移动。图 6 为相移 $\Delta\varphi = \pi/2, \Delta\varphi = \pi$ 时,系统的 MTF。

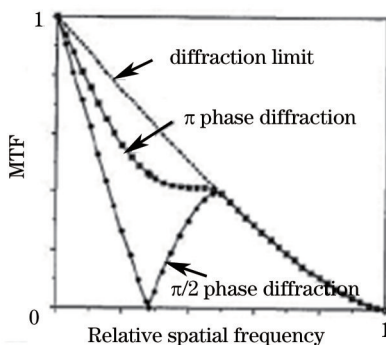


图 6 $\Delta\varphi = \pi/2, \Delta\varphi = \pi$ 时系统的理论调制传递函数

Fig.6 Theoretical MTF of system when $\Delta\varphi = \pi/2, \Delta\varphi = \pi$

2.3 复色光入射下的 MTF 计算

依据(14)式,OTF 包含相移 $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$,且 $\Delta\varphi$ 与波长相关。多色光照明时,光波场中任意点的光振动的振幅和相位都是随时间做无规则变化,其相位取值在 $0 \sim 2\pi$ 之间随机取值。OTF 必须计算谱段内的平均值。假设入射光为非相干光,非相干的极限条件为:

$$\Delta D \cdot \Delta k = \Delta D \cdot (2\pi/\lambda_1 - 2\pi/\lambda_2) \gg 1, \tag{15}$$

式中 λ_1, λ_2 分别为照明光谱的短波波长和长波波长。由(11)式和(15)式知,相位差 $\Delta\varphi$ 为 $0 \sim 2\pi$ 之间所有值,因此,当取波段内所有波长 OTF 平均值时,含有 $\exp(j\Delta\varphi)$ 的项将为零,得到非相干的 OTF 为^[7]:

$$\begin{aligned}
 T(f_x, 0) &= M(2f_x) \quad 0 \leq f_x/2f_0 \leq 1/2 \\
 &= 0 \quad f_x/2f_0 \geq 1/2
 \end{aligned} \tag{16}$$

由(16)式可得非相干照明时的 MTF,如图 7 所示。系统的 MTF 减小到入瞳尺寸一半时的理论传递函数。

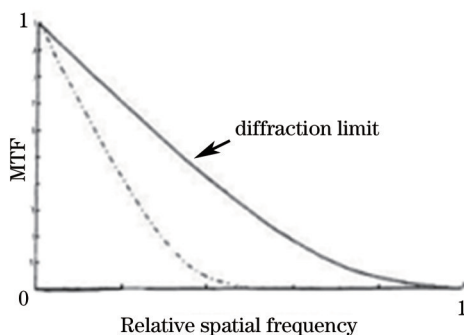


图 7 非相干系统的理论调制传递函数

Fig.7 Theoretical MTF of incoherent system

由于非相干受限,可理解为总的衍射斑为两个波前的非相干叠加。因此,其PSF降为孔径一半时的PSF。

3 基于Zemax模拟仿真使用拼接窗口对系统的影响

3.1 两片式拼接窗口简化模型分析

当利用Zemax构建如图2和图3这种立体模型进行分析时会发现,计算过程缓慢,无法得到准确的结果。因此要采取一种简化模型进行高效便捷的分析,首先模拟仿真两片式拼接窗口的情况,在此之前要将此情况简化为图8系统结构。此时光程差 ΔD 和相位差 $\Delta\varphi$ 分别为:

$$\Delta D = d(n - 1), \tag{17}$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot \Delta D}{\lambda}, \tag{18}$$

式中 d 为平行平板厚度, n 为平行平板折射率, λ 为入射光线波长。

根据(17)式和(18)式可知,通过改变平行平板的厚度可以改变上下两部分光线的光程差,进而达到控制两部分光线的相位差,模拟拼接窗口对光线的影响。假设入射波长为 $\lambda = 0.587 \mu\text{m}$,平板选取蓝宝石材料, $n=1.768$ 。根据(17)式和(18)式,计算出不同 d 对应的 ΔD 和 $\Delta\varphi$,结果如表1所示。

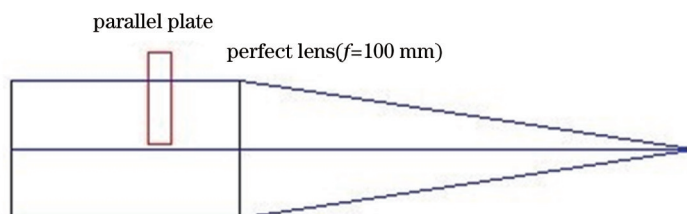


图8 拼接窗口简化模型

Fig.8 Simplified model of the stitched windows

表1 不同d对应的 ΔD 和 $\Delta\varphi$

Table 1 ΔD and $\Delta\varphi$ corresponding to different thicknesses

D	ΔD	$\Delta\varphi$
0.191022594 μm	0.14675 μm	$\pi/2$
0.382045188 μm	0.2935000993 μm	π

利用Zemax软件仿真模拟简化模型,将系统口径设置为80 mm,玻璃材料选取蓝宝石材料,波长选为 $0.587 \mu\text{m}$ 。入射光一半垂直穿过平行平板上,一半直接在空气中传播,得到相位差 $\Delta\varphi = 90^\circ$ 和 $\Delta\varphi = 180^\circ$ 时系统的MTF和PSF,如图9和图10所示。可见,仿真结果与理论分析结果相符,该分析方法是正确的。对于非相干光,由于Zemax无法仿真无限波段的情况,但可以根据非相干的极限条件,利用等权重满足(15)式的相邻波长来解决该问题。因此仿真非相干光,采用波长的组合为: $0.502 \mu\text{m}$ 和 $0.5 \mu\text{m}$, $0.4 \mu\text{m}$ 和 $0.402 \mu\text{m}$, $0.45 \mu\text{m}$ 和 $0.451 \mu\text{m}$, $0.6 \mu\text{m}$ 和 $0.602 \mu\text{m}$, $0.55 \mu\text{m}$ 和 $0.551 \mu\text{m}$, $0.587 \mu\text{m}$ 和 $0.5 \mu\text{m}$, $88 \mu\text{m}$, $0.487 \mu\text{m}$ 和 $0.486 \mu\text{m}$, $0.656 \mu\text{m}$ 和 $0.657 \mu\text{m}$ 。非相干光通过拼接窗口后,系统的MTF和PSF如图12所示。

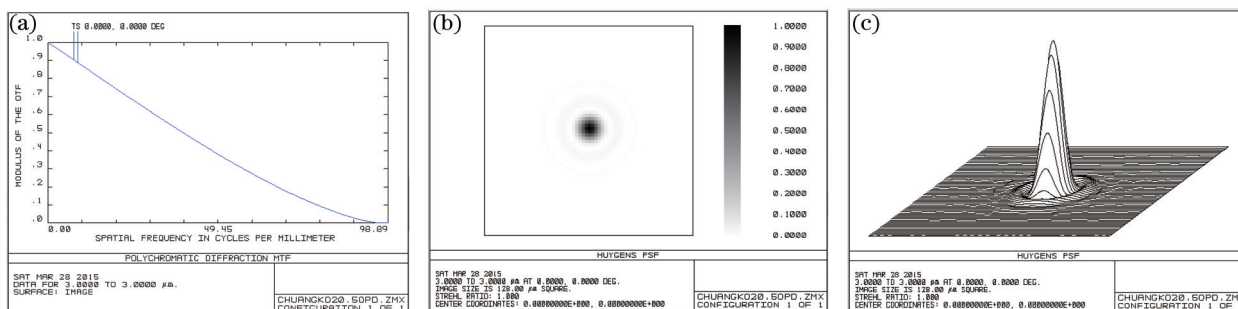


图9 $\Delta\varphi = 0^\circ$ 时光学系统的(a)MTF, (b) PSF灰度图和 (c) PSF 三维图

Fig.9 (a) MTF, (b) grayscale of PSF and (c) three-dimensional map of PSF of the optical system when $\Delta\varphi = 0^\circ$

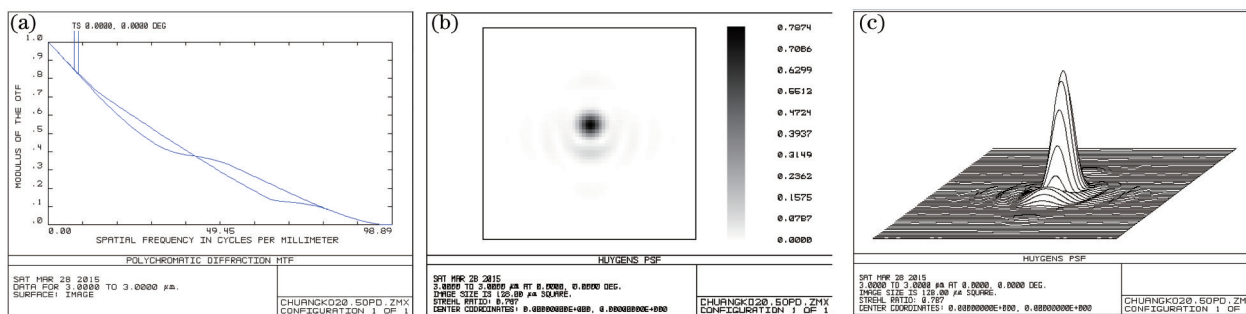


图 10 $\Delta\varphi = 90^\circ$ 时光学系统的(a)MTF, (b)PSF 灰度图和 (c) PSF 三维图

Fig.10 (a) MTF, (b) grayscale of PSF and (c) three-dimensional map of PSF of the optical system when $\Delta\varphi = 90^\circ$

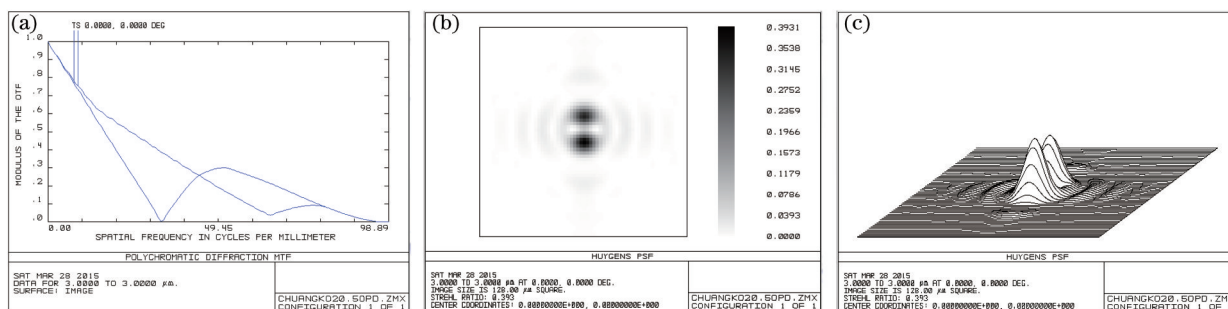


图 11 $\Delta\varphi = 180^\circ$ 时光学系统的(a) MTF, (b) PSF 灰度图和 (c) PSF 三维图

Fig.11 (a) MTF, (b) grayscale of PSF and (c) three-dimensional map of PSF of the optical system when $\Delta\varphi = 180^\circ$

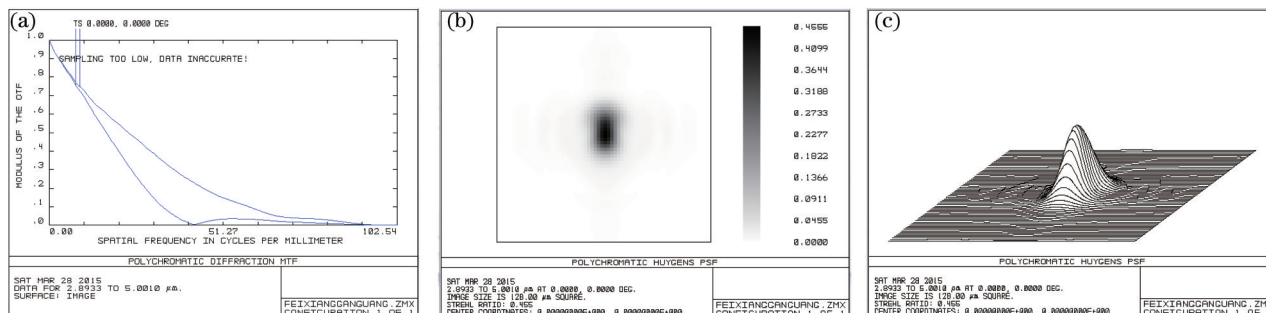


图 12 非相干光学系统的 (a) MTF, (b) PSF 灰度图和 (c) PSF 三维图

Fig.12 (a) MTF, (b) grayscale of PSF and (c) three-dimensional map of PSF of the incoherent optical system

将上述结果与理论图 6 和图 7 对比,简化模型的分析结果与理论值相符合。即,相干光照射下,当相位差为 $\pi/2$ 时,MTF 在 1/2 最大空间频率左右,降至 0.4 左右。当相位差为 π 时,MTF 在 1/3 最大空间频率左右,降至 0 左右。当入射光为非相干光,MTF 为全口径时 MTF 的一半,频率大于 1/2 最大空间频率处的 MTF 值为零。

3.2 三片拼接窗口简化模型分析

基于 Zemax 软件,利用定义多边形功能构建拼接窗口模型,借鉴两片式拼接窗口简化模型,对于三片拼接窗口,采取如图 13 所示的简化分析模型。这里所使用的模型为 40 mm × 40 mm 的正方形平板,将之分为厚度可

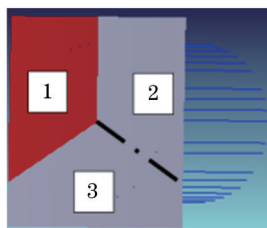


图 13 三片式拼接窗口简化模型

Fig.13 Simplified model of the three glasses stitched windows

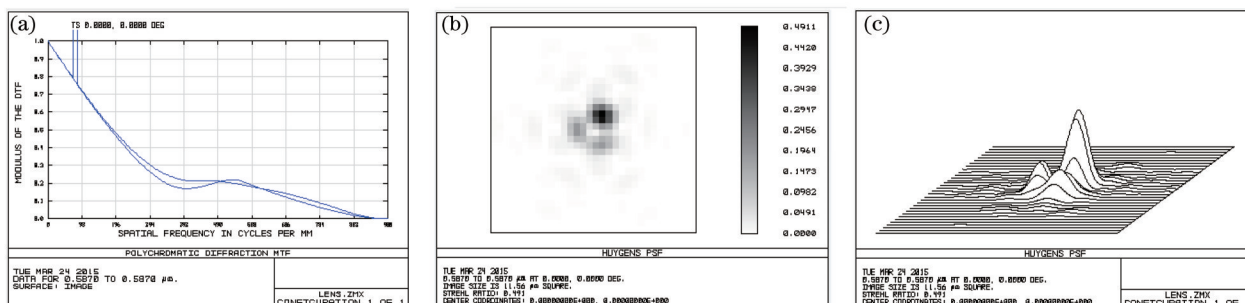


图 14 $d_1=0.25 \lambda, d_2=0.5 \lambda, d_3=1 \lambda$ 时系统的 (a) MTF, (b) PSF 灰度图和 (c) PSF 三维图

Fig.14 (a) MTF, (b) grayscale of PSF and (c) three-dimensional map of PSF of system when $d_1=0.25 \lambda, d_2=0.5 \lambda, d_3=1 \lambda$

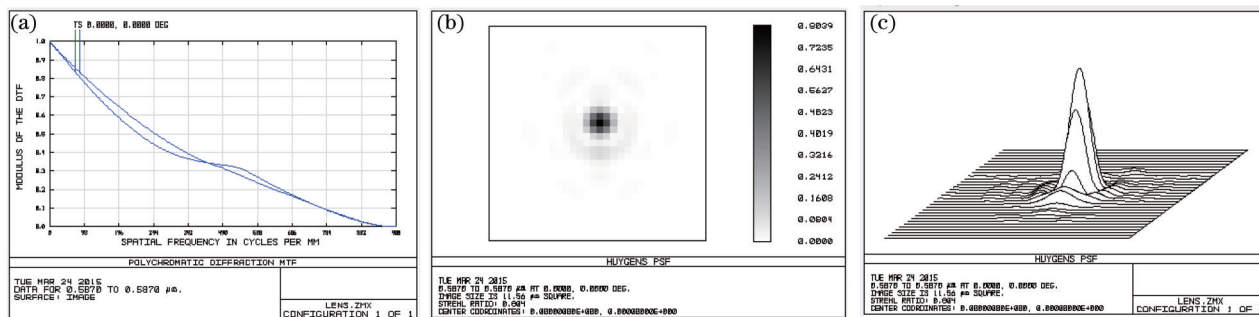


图 15 $d_1=0.25 \lambda, d_2=0.5 \lambda, d_3=0.5 \lambda$ 时系统的 (a) MTF, (b) PSF 灰度图和 (c) PSF 三维图

Fig.15 (a) MTF, (b) grayscale of PSF and (c) three-dimensional map of PSF of system when $d_1=0.25 \lambda, d_2=0.5 \lambda, d_3=0.5 \lambda$

以改变的三部分,材料统一为蓝宝石,入射波长为 $\lambda = 0.587 \mu\text{m}$,通过设定各个部分平板的厚度,模拟出三部分光程差不同的光线。三部分对应不同厚度时(三部分分别对应厚度 d_1, d_2, d_3),即可得到系统的 MTF 和 PSF 图,分别如图 14 和图 15 所示。

3.3 入射角对系统的 MTF 和 PSF 影响

在上述基础上,分析入射光线入射角不同时,MTF 和 PSF 的变化关系。利用定义多边形功能构建拼接窗口模型,结构图和模型图分别如图 16 和 17 所示。窗口厚度为 d 。如图 4 和图 5 所示,当光线以不同入射角入射时,对应的则是不同的光程差,进而产生不同的相位差,由此可知系统的 MTF 和 PSF 也处于变化之中。根据(1)~(4)式,可以计算出窗口夹角一定时,入射角和光程差的关系。假设拼接窗口夹角为 120° ,入射波长取为 $0.486 \mu\text{m}$ 和 $0.587 \mu\text{m}$ 或者 $\lambda = 0.587 \mu\text{m}$,厚度 $d=2 \text{ mm}$,通过改变入射角得出不同光程差情况下的 MTF 和 PSF 图,如表 2 所示。

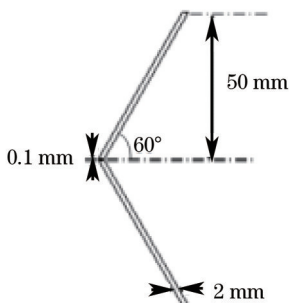


图 16 两片式拼接窗口结构图

Fig.16 Model of the two glasses stitched windows

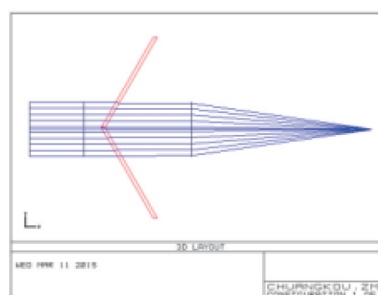
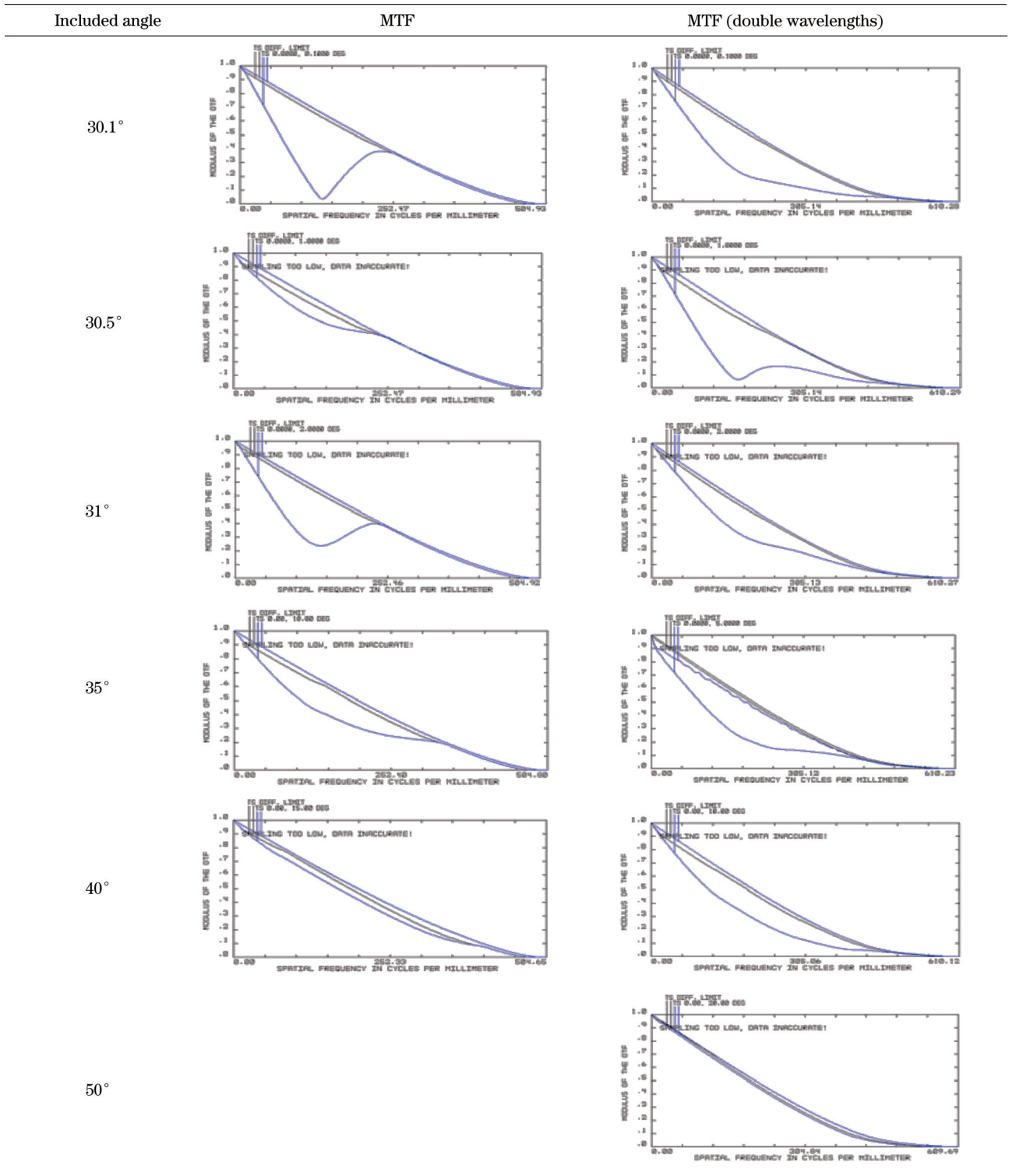


图 17 两片式拼接窗口仿真图

Fig.17 Simulation of the two glasses stitched windows

表2 不同入射角情况下的MTF
Table 2 MTF when included angle is different



从表2可以看出,入射角在 $\pi/6$ (夹角为 120° 时,当入射角为 $\pi/6$ 时,OPD为零)左右小范围变化时,满足干涉条件,MTF的变化呈现波动变化。当入射角满足使光程差超出相干范围时,MTF接近理想系统的MTF。系统MTF随入射角度变化而变化的程度与谱段宽度成反比,谱段越宽越多,越接近非相干光,相干性越弱。结合图5也可分析出:入射角变化的结果是光程差的变化,进而导致MTF和PSF的变化,变化趋势呈波动状态。

3.4 拼接窗口参数对系统的MTF和PSF影响

通过上述的分析,可以发现影响MTF和PSF变化的归根结底还是拼接窗口对入射光分割导致的光程差和相位差产生了差异。在光学系统设计过程中,需要得到拼接窗口的具体参数。所以需要进一步分析拼接窗口的参数对系统的MTF和PSF影响。假设拼接窗口夹角为 a ,窗口材料折射率为 n ,窗口厚度为 d ,波长为 $\lambda=0.587\ \mu\text{m}$ 。通过(1)~(4)式,得到了图18~20。分别为拼接窗口不同情况下、窗口材料不同情况下和窗口厚度不同情况下的光程差相位差随入射角的变化关系。可以发现 a, n, d 改变的是光程差相位差随入射角的变化关系图的斜率,比如夹角不同时,当 $a=\pi/6$ 时,随着光学系统的扫摆,入射角从 $-1.5\ \text{rad}$ 变为 $-1\ \text{rad}$,其光程差从 $-0.2\ \text{mm}$ 变为 $0.2\ \text{mm}$;当 $a=\pi/4$ 时,随着光学系统的扫摆,入射角从 $-1.5\ \text{rad}$ 变为 $-1\ \text{rad}$,其光程差从 $-0.6\ \text{mm}$ 变为 $0.6\ \text{mm}$,对应的MTF如图21和图22。光学系统扫摆过程中,由图22可见, $a=\pi/4$ 时OPD-入射角曲线满足干涉条件的部分显然相比于 $a=\pi/8, a=\pi/4$ 时短,即变化的光程差满足干涉条件的部分相对较少,拼接窗口对MTF和PSF影响较小。同理,当选择蓝宝石材料时,光程差相位差随入射角的变化曲线比使用硫化锌时更陡,变换范围更大。厚度不同情况下,厚度约厚,拼接窗口对MTF和PSF影响较小。具体选择的夹角和厚度还需要结合设计要求。

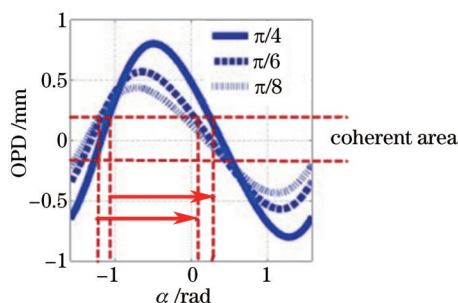


图 18 光程差随入射角的变化关系(夹角不同)
Fig.18 Diagram of the OPD and the incident angle when included angle is different

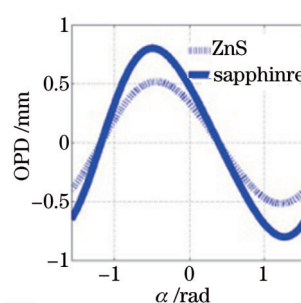


图 19 光程差随入射角的变化关系(材料不同)
Fig.19 Diagram of the OPD and the incident angle when material is different

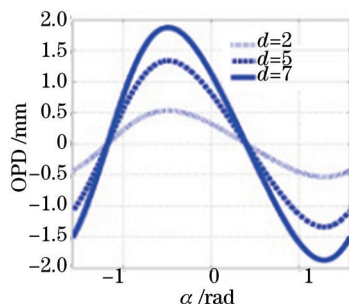


图 20 光程差和相位差随入射角的变化关系(厚度不同)
Fig.20 Diagram of the OPD and the incident angle when thickness is different

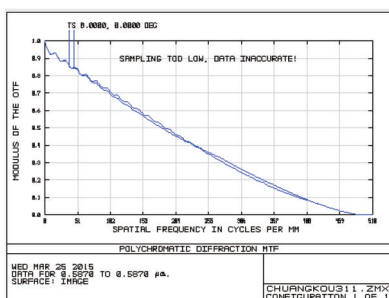


图 21 $\Delta D=0.8\ \text{mm}$ 的 MTF
Fig.21 MTF when $\Delta D=0.8\ \text{mm}$

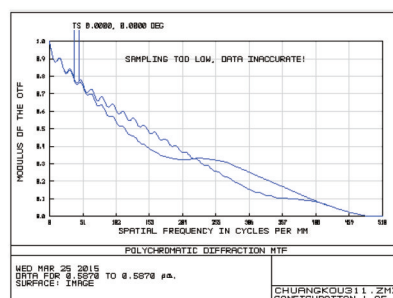


图 22 $\Delta D=0.2\ \text{mm}$ 的 MTF
Fig.22 MTF when $\Delta D=0.2\ \text{mm}$

4 结 论

通过分析方法,利用Zemax软件构建拼接窗口模型,简化拼接窗口分析过程,得出不同情况下采用拼接窗口光学系统波前分割后的传函和点扩散函数,得到的PSF函数可以利用Matlab软件模拟出PSF的变化对图像退化的影响。同时分析得出窗口夹角,厚度和材料选择对传函和点扩散函数的影响。结果表明,采用拼接式光学窗口的光电系统,入射波前在窗口处被各个拼接玻璃分割,当光线以某些角度入射到光学窗口时,会产生特定的光程差,使MTF和PSF发生严重下降和劈裂,PSF发生严重劈裂的系统会使光学系统成像质量下降。采用较大夹角的拼接窗口,采用蓝宝石材料以及采用较厚的窗口厚度均会缓解窗口对光学系统的影响,对于采用拼接式窗口的光学系统具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Li Yanwei, Zhang Hongwen, Yuan Guoqin, *et al.*. Design of protector for altitude sub-assembled optical window[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(3): 664-669.
李延伟, 张洪文, 远国勤, 等. 高空分段拼装式光学窗口防护装置的设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(3): 664-669.
- 2 Fang Yu, Xiangli Bin, Lv Qunbo, *et al.*. Design of optical window thickness and influence of its deformation on multi-spectral camera's optical performance[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422007.
方煜, 相里斌, 吕群波, 等. 光学窗口厚度设计及形变对相机性能影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422007.
- 3 Zhang Peng, Zhao Chunzhu, Cui Qingfeng. Design method of an aerial conformal optical window[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0622006.
张鹏, 赵春竹, 崔庆丰. 航空共形光学窗口的设计方法[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0622006.
- 4 Shen Honghai, Huang Meng, Li Jiaquan, *et al.*. Recent progress in aerial electro-optic payloads and their key technologies[J]. Chinese Optics, 2012, 5(1): 20-28.
沈宏海, 黄猛, 李嘉全, 等. 国外先进航空光电载荷的进展与关键技术分析[J]. 中国光学, 2012, 5(1): 20-28.
- 5 Chang Songtao, Sun Zhiyuan, Zhang Yaoyu, *et al.*. Radiation measurement of small targets based on PSF[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(11): 2879-2287.
常松涛, 孙志远, 张尧禹, 等. 基于点扩散函数的小目标辐射测量[J]. 光学精密工程, 2014, 22(11): 2879-2287.
- 6 Zeng Chaoyang, Jia Yunhe, Dai Qongsong, *et al.*. Analysis of infrared optical system influence in infrared image simulation[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(10): 1108-1111.
曾朝阳, 贾云鹤, 戴琼松, 等. 图像模拟中的红外光学系统影响分析[J]. 激光与红外, 2009, 39(10): 1108-1111.
- 7 Freiman D, Nadler M, Gronau Y. Effect of segmented windows on the MTF of optical systems[J]. 9th Meeting on Optical Engineering in Israel, 1995, 1117(12): 211-218.
- 8 Lv Naiguang. Fourier Optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 157-159.
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 157-159.
- 9 Liang Quanting. Physical Optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 271-275.
梁铨廷. 物理光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 271-275.
- 10 Hao Linbin. The Point Spread Function of Imaging System by Polychromatic Light Illumination[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2010: 9-12.
郝林斌. 复色光照明条件下成像系统的点扩散函数[D]. 西安: 陕西师范大学, 2010: 9-12.
- 11 I Gimlett. Modulation transfer function degradation in segmented windows[J]. Appl Opt, 1992, 31(16): 2981-2982.
- 12 Jones M I, Jones M S. Optical analysis of segmented aircraft windows[J]. Tactical Infrared Systems, 1991, 1498(1): 110-126.

栏目编辑: 韩峰