

激光在高光谱相机光学系统中的传输

王彦斌, 陈前荣, 李 华, 王 敏, 邹前进

(中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 随着高光谱相机在工业、农业、科研、国防等众多领域的广泛应用, 发展有效的对抗技术也迫在眉睫, 激光有源压制干扰是当前对抗高光谱相机的一个有效手段。以双高斯光学系统为例, 首先依据高斯光束 q 参数的传输理论, 逐个分析了激光束在高光谱相机光学系统各透镜中的传输, 获得了其探测器光敏面上的激光能量分布; 然后研究了激光发射参数对探测器光敏面上能量分布的影响, 结果表明: 探测器光敏面上激光主光斑的大小随激光器对高光谱相机作用距离的增加而减小, 随激光束腰尺寸的增大却是先减小后增大, 整个变化过程中存在一个最小值, 为实现较好的激光干扰效果, 激光束腰的设计要尽量避开这个最小值。研究结果可为开展激光有效干扰高光谱成像系统试验以及激光器参数的优化设计提供理论依据和技术支持。

关键词: 激光有源压制干扰; 高光谱相机; 双高斯光学系统; q 参数

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3250-06

Laser propagation in optical system of hyper-spectral camera

Wang Yanbin, Chen Qianrong, Li Hua, Wang Min, Zou Qianjin

(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China)

Abstract: As hyper-spectral cameras have been widely used in many fields such as industry, agriculture, scientific research, military, etc, it is urgent to develop the effective countermeasure, laser active suppressing jamming is presently one of the most effective technologies to cope with hyper-spectral cameras. Double-Gauss optical system was taken as an example; first of all, the laser propagation in every lens was analyzed based on the propagation theory of Gaussian beam's q parameter, and the energy distribution on the photosensitive surface of the system's detector was obtained. The influences of laser launch parameters were subsequently investigated on the energy distribution. The results show that the laser spot on the photosensitive surface decrease with the increase of laser and hyper-spectral camera's distance, however, with the increase of laser waist there is a minimum in the whole variation trend of laser spot. To achieve the better laser jamming effect, the minimum should be avoided in designing the laser waist. The research fruit can provide the theoretical basis and technical support for carrying out the experiment of laser jamming hyper-spectral imaging system and optimal design of laser launch parameter.

Key words: laser active suppressing jamming; hyper-spectral camera; double-Gauss optical system; q parameter

收稿日期: 2015-03-05; 修订日期: 2015-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(11504420)

作者简介: 王彦斌(1982-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光电对抗方面的研究。Email: wangyanbin82@163.com

0 引言

高光谱相机具有极高的光谱分辨率和空间分辨率,因此被广泛应用于工业、农业、科研、航天、国防等国民生活的各个领域^[1-2]。为积极应对高光谱相机从四面八方对我军事基地和重要设施进行监测、侦察的危险,发展有效的对抗高光谱相机技术迫在眉睫。激光以光速传播瞬时可击中目标,尤其能够以很窄的光束和频段发射大量的能量,采用激光对抗高光谱相机可扰乱其探测器光敏面上的能量/光强分布,进而降低生成目标/背景图像的像面层次和清晰度,严重时造成整个像面无法识别,甚至损伤探测器及整个高光谱成像系统^[3-4]。因此,采用激光对抗高光谱相机是影响其性能正常发挥的一个有效手段^[5-6]。

考核和评估干扰激光对高光谱成像系统的影响和破坏程度主要是由激光经其前置光学系统传输到达探测器光敏面上的能量/光强分布决定的,因此,定量地计算出激光束到达探测器光敏面上的能量/光强分布是综合评估激光干扰效果和作用效能的前提和必要条件。双高斯光学系统是一种典型的透射式光学系统,由于其属于基本对称型结构,比较容易在宽光谱范围内修正像差,自动抵消轴外像差,因而在高光谱成像系统、侦察和监测设备中多有采用^[7-8]。文中以双高斯光学系统为例,依据高斯光学理论,主要是高斯光束 q 参数的传输变换规律,定量计算激光束在光学系统各透镜中的传输,获得最终探测器光敏面上主光斑的能量/光强分布,并深入研究激光发射参数对能量/光强分布的影响。

1 双高斯光学系统的理论模型

图 1(a)、(b)分别显示了双高斯光学系统在光机软件 LightTools 中的三维实体图和光学设计软件 ZEMAX 中的几何线框图,由图可见该系统主要由四个透镜和一个光阑组成,其中包含两个胶合透镜。胶合透镜胶合的两个镜面基本一致,一般算作一个镜面,加上光阑面和最后探测器光敏面所在的平面(Image),双高斯高光谱成像光学系统包含十二个面。为下面叙述方便,在图 1(b)中将该系统的各镜片与光阑从左到右依次标注为:透镜 1(Lens 1)、胶合透镜 1(Doublet 1)、光阑(Stop)、胶合透镜 2(Doublet 2)、

透镜 2(Lens 2)。同时,在表 1 详细列出了双高斯光学系统的材料组成、面形参数、透射特性等。ZEMAX 对该系统的分析表明:系统全视场为 28° ,物方和像方焦距 f 均为 100 mm ,入瞳口径 D 为 33.3 mm ,因此系统的 F 数为 3.0 。

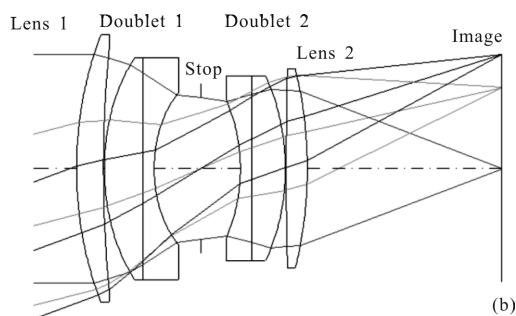
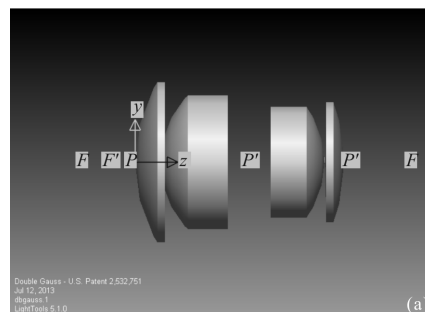


图 1 双高斯光学系统的三维实体图(a)和线框图(b)

Fig.1 3D entities picture (a) and wireframe (b) of double-Gauss optical system

表 1 双高斯光学系统的详细参数

Tab.1 Structural parameters of double-Gauss optical system

Optical element	Material	Surface	Radius /mm	Diameter /mm	Refractivity @1.06 μm	Transmittance @1.06 μm
Lens 1	BSM24_ OHARA	Front	54.2	55.3	1.60	0.97
		Back	152.5	56.1		
Doublet 1	SK1_SC HOTT	Front	36.0	48.5	1.59	0.97
		Middle	Inf	42.5		
Doublet 1	F15_SC HOTT	Front	22.3	30.0	1.59	0.97
		Back	22.3	30.0		
Stop		Stop	Inf	20.5		1.00
Doublet 2	F15_SC HOTT	Front	25.7	26.4	1.59	0.97
		Middle	Inf	32.9		
Doublet 2	SK16_S CHOTT	Front	37.0	37.8	1.60	0.97
		Back	37.0	37.8		
Lens 2	SK16_S CHOTT	Front	196.4	42.4	1.60	0.97
		Back	67.1	43.0		

2 激光束在双高斯光学系统中的传输

实际激光器发射的激光,在横截面能量分布、纵向传输方面与高斯光束最为接近,因此,近距离(激光束腰与光学系统入瞳的距离 $L < D/\lambda = 32 \text{ m}$)传输时,高斯光学理论通常采用高斯光束模型来研究实际激光的能量分布与传输问题,而当远距离传输时($L \gg D/\lambda$),此时入瞳处的激光光斑远大于光学系统入瞳,需要考虑遮拦问题。

2.1 理论基础

高斯光学理论认为,沿 z 轴方向传输的基模高斯光束,不管它是由何种结构的稳定腔所产生的,均可表示为如下的一般形式:

$$\psi(x, y, z) = \frac{c}{\omega(z)} e^{-\frac{x^2+y^2}{\omega^2(z)}} e^{-i\left[k\left(z+\frac{z}{2R(z)}\right) - \arctan \frac{z}{f}\right]} \quad (1)$$

式中: $\psi(x, y, z)$ 为基模激光的场复振幅分布; c 为常数因子; $\omega(z)$ 为以束腰为计算起点,与传播轴线相交于 z 点的高斯光束等相位面上的光斑半径,表达式为

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2} \quad (2)$$

式中: ω_0 为激光束的束腰半径,通常认为激光器的束腰在激光器的出光口附近。需要指出的是,公式(1)模的平方即为激光的能量分布,因此高斯光束的光斑半径实际上决定了激光束横截面的能量分布; f 为高斯光束的共焦参数或称为瑞利长度,表达式为

$$f = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \quad (3)$$

公式(1)中, $R(z)$ 为与传播轴线相交于 z 点的高斯光束等相位面的曲率半径,表达式为

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2 \right] = z + \frac{f^2}{z} \quad (4)$$

为便于研究激光束在自由空间和经过透镜、反射镜等光学器件的传输,高斯光学引入 q 参数,其定义为

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi \omega^2(z)} \quad (5)$$

研究表明:高斯光束 q 参数在自由空间和光学器件中的传输满足 $ABCD$ 公式,即

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad (6)$$

式中: q_1 和 q_2 分别为传输前后光束的 q 参数, A 、 B 、

C 、 D 为自由空间和光学器件对应的变换矩阵。例如在自由空间传输距离 L 的变换矩阵 T_L 和焦距为 F 薄透镜的变换矩阵 T_F 分别为

$$T_L = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_F = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/F & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其他不同的光学器件对应的传输变换矩阵可以参阅高斯光学手册。对于复杂的光学器件,如厚透镜和胶合透镜,文中采取球面变换加介质传输变换的方式进行逐个计算。例如图1(b)中的透镜1,先经过前表面的变换,再通过透镜介质中的传输,最后经过后表面的变换,即可完成激光束在透镜1中的传输。

2.2 激光束在双高斯系统各镜面中的传输

采用高斯光束 q 参数的传输变换规律,即上述 $ABCD$ 公式,逐个计算双高斯光学系统中各镜面对激光束的变换,研究激光束经过各镜面时的参数变化以及最终在探测器光敏面上的能量/光强分布。假设干扰激光束的中心波长为 1064 nm ,束腰尺寸为 10 mm ,光束束腰在激光器出光口,距离光学系统第一镜面(即透镜1前表面)的距离为 30 m 。表2详细列出了束腰为 10 mm 的激光束经过双高斯光学系统

表 2 激光在双高斯光学系统中的传输

Tab.2 Laser propagation in double-Gauss optical system

Optical element	Surface	Spot size /mm	Radius/mm	Divergence/mrad	Rayleigh range/mm
Lens 1	Front	10.1	-145.2	69.1	0.04
	Back	9.44	-128.4	73.4	0.06
Doublet 1	Front	9.41	-65.0	143.7	0.01
	Middle	7.38	-50.3	145.6	0.01
Stop	Back	6.83	-129.1	52.8	0.12
	Stop	6.07	-114.9	52.8	0.12
Doublet 2	Front	5.42	121.4	44.6	0.11
	Middle	5.59	126.9	44.0	0.11
Lens 2	Back	6.06	-209.8	28.9	0.41
	Front	6.05	-204.2	29.6	0.24
Image	Back	5.85	-58.1	100.2	0.03
	Image	0.08	-0.83	100.2	0.03

各镜面一直传输到探测器光敏面上的主要参数,表中光斑尺寸是指在相应镜面上的光斑直径,mm;曲率半径是指在相应镜面上的高斯光束等相位面的曲率半径,mm;半发散角是光束全发散角的一半,mrad;共焦参数为经过相应镜面后光束的共焦参数,mm。

由表 2 数据可以发现,只有各镜面上激光束的光斑尺寸的变化趋势呈现一定的规律性,即光斑尺寸总体趋势在不断减小,其他参数包括激光束的曲率半径、半发散角、共焦参数在传输过程中并没有呈现一定的规律性,这是因为双高斯光学系统各镜面的曲率参数(见表 1)并不相同,所以各镜面的焦距也不相同,由于公式(7)镜面的变换矩阵与其焦距相对应,变换矩阵也就不相同,所以激光束的曲率半径、半发散角、共焦参数在传输过程中的变化没有规律性。为了详细研究激光束在各镜面上光斑尺寸的变化趋势,在图 2 中将各镜面上的光斑直径与对应镜面进行一一对照,接收面即为探测器光敏面。可以清晰地看到,束腰为 10 mm 的激光束在双高斯光学系统中传输时,从入射面(透镜 1 前表面)到接收面(探测器光敏面)各面上的光斑直径总体在不断减小,只是在胶合透镜组 2 三个镜面(前表面、胶合面、后表面)上的光斑直径略有增大,这是由于胶合透镜组 2 的左边透镜是凹透镜(中心比边缘薄),它的发散作用导致激光束直径增大,最终由于胶合透镜组 2 的右边凸透镜和透镜 2 的会聚作用使得激光的光斑尺寸重新继续减小,并在探测器光敏面上光斑直径减小到了 82.5 μm 左右。如果高光谱相机采用像元规模 800×800、像元大小 4 μm 的探测器接收光敏面上的激光光斑,约占 334 个像素,其能量分布如图 3 所示。

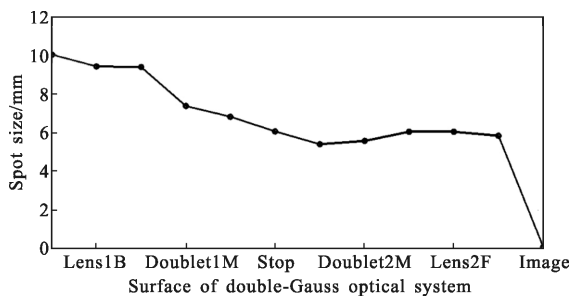
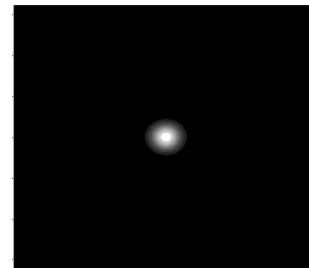


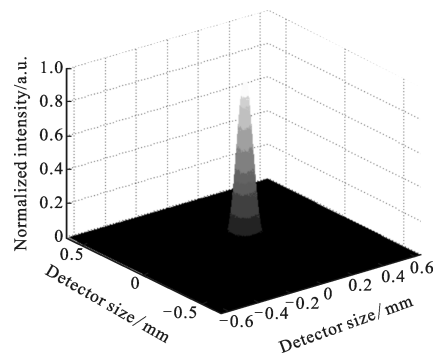
图 2 激光束在各镜面上的光斑尺寸

Fig.2 Spot size at every surface of double-Gauss optical system



(a) 二维分布

(a) 2D distribution



(b) 三维分布

(b) 3D distribution

图 3 探测器光敏面上的激光能量分布

Fig.3 Laser energy distribution at the image

2.3 激光发射参数对探测器上能量分布的影响

理论分析中已经指出高斯光束横截面的能量分布主要是由其光斑半径/尺寸决定的,因此,分析激光发射参数对探测器光敏面上能量分布的影响可以转化为研究激光发射参数对光敏面上激光主光斑半径/尺寸的影响。首先,研究激光器束腰与双高斯光学系统入射面之间的距离对最终探测器光敏面上光斑尺寸的影响。保持激光器束腰为 10 mm 不变,计算束腰与入射镜面(光学系统第一镜面)相距 0.5~32 m 范围内探测器光敏面上光斑尺寸的变化趋势,如图 4 所示。可见随着激光束腰与入射镜面作用距离的增加,即激光器对双高斯光学系统作用距离增加,在探测器光敏面上的主光斑尺寸却在减小,但减小的速度非常缓慢,0.5 m 时光斑直径 83 μm,而 32 m 处光斑直径 82.4 μm,因此可以认为在近距离范围内干扰激光在探测器上的光斑尺寸变化不大。

在激光束腰距离光学系统较远时,达到入瞳处的光斑半径远大于入瞳口径,因此需要考虑遮拦问题。当激光束腰与光学系统距离满足 $D/\lambda \ll L \ll D^2/\lambda$

$\lambda=1\text{ km}$, 对应夫琅禾费衍射情况, 到达探测器激光主光斑直径 d 可写为:

$$d=f\times\theta=13\text{ }\mu\text{m} \quad (8)$$

式中: f 为光学系统焦距; θ 为激光发散角, 可以通过公式 $\theta\times H=4\lambda/\pi$ 得到, 文中假设激光束腰 $H=10\text{ mm}$, 则 $\theta=0.13\text{ mrad}$ 。当激光束腰与光学距离进一步增大, 满足 $L\gg D^2/\lambda=1\text{ km}$ 时, 激光可近似为平行光处理, 到达探测器激光主光斑的直径 d 又可写为:

$$d=2.44\lambda F/D=7.3\text{ }\mu\text{m} \quad (9)$$

因此, 随着激光束腰与光学系统作用距离的逐渐增大, 探测器上激光主光斑的尺寸在不断减小, 但是这并不意味着激光干扰效果或者干扰面积是在减弱, 远距离的激光主光斑直径虽然很小, 但是激光受入瞳、镜筒、光阑实际尺寸的限制而产生的衍射效应仍然能够实现对探测器光敏面大面积的有效干扰。

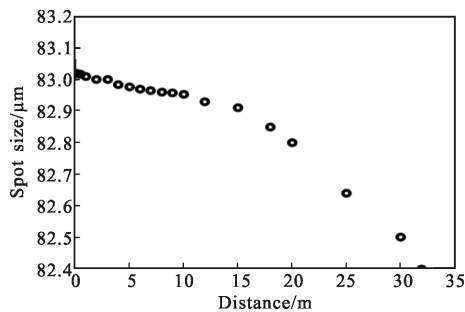


图 4 不同作用距离下探测器光敏面上的光斑尺寸
Fig.4 Spot size at the image under different distance

其次, 研究了不同激光束束腰尺寸对最终探测器光敏面上光斑尺寸的影响。如图 5 所示, 保持束腰与双高斯光学系统入射面的距离为 30 m 不变, 计算了束腰在 $0.02\text{ mm}\sim 10\text{ cm}$ 范围内变化时探测器光敏面上的光斑尺寸。由图可见, 探测器上的光斑尺寸并不是随着束腰尺寸的增大而单调地变化, 而是经过两个阶段: 先随着束腰的增大而减小, 然后随着束腰的增大而增大。对于文中的双高斯光学系统来说, 在激光器束腰大小约为 3 mm 时, 探测器上的光斑直径达到最小, 仅为 0.03 mm , 对于像元大小 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的探测器来说, 激光光斑仅占 44 个像元; 而在激光器束腰大小的两端, 比如束腰大小约为 0.02 mm 时, 探测器上的光斑直径为 2.526 mm , 激光光斑约占 313 211 个像元; 束腰大小约为 10 cm 时, 探测器上的光斑直径为 0.83 mm , 光斑约占 33 816 个像元。由以上分析

发现, 激光器束腰的大小是影响激光干扰效果的一个重要因素。这里仅是以双高斯光学系统为例, 对于不同的光学系统, 使得探测器光敏面上光斑尺寸最小对应的激光器束腰尺寸也不相同, 因此, 论证干扰激光发射参数时, 应首先对作战对象高光谱相机的光学系统进行仿真分析, 找出探测器上最小光斑对应的激光器束腰, 激光器的设计研制中要尽量避免, 同时, 为获得较好的激光干扰效果, 尽可能选用能够在探测器光敏面上获得较大光斑尺寸的激光器。

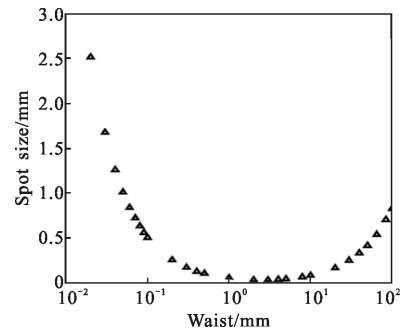


图 5 不同束腰下探测器光敏面上的光斑尺寸
Fig.5 Spot size at the image under different waist

3 结论

研究了干扰激光在双高斯光学系统中的传输以及在探测器光敏面上的能量分布。以双高斯光学系统为例, 详细计算了激光束在该系统各镜面传输时的参数变化, 并分析了激光发射参数对探测器光敏面上能量分布的影响。结果发现, 光敏面上激光主光斑的大小随激光器对高光谱相机作用距离的增加而减小, 随激光束腰尺寸的增大却是先减小后增大, 整个变化过程存在一个最小值, 对于双高斯光学系统来说, 这个最小值出现在激光束腰 3 mm 处。因此, 为实现较好的激光对抗高光谱相机效果, 在激光器束腰的设计中应尽量避免这个束腰最小值, 尽可能选用能在光敏面上获得较大光斑尺寸对应的束腰值。文中的研究结果可为开展激光有效干扰高光谱成像系统试验以及激光器参数的设计等提供理论依据和技术支持。

参考文献:

- [1] Li Ying, Liu Bingxin, Chen Peng. Research progress of hyper-spectral remote sensing technology in oil spill monitor

- [J]. *Journal of Marine Environment*, 2012, 31 (3): 460–464. (in Chinese)
李颖, 刘丙新, 陈澎. 高光谱遥感技术在水上溢油监测中的研究进展[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(3): 460–464.
- [2] Lu Hui, Han Jianguo, Zhang Luda. Harm degree research on hyper-spectral remote sensing model for *Oedaleus asiaticus*[J]. *Spectroscopy and Spectrum Analysis*, 2009, 29(3): 745–748. (in Chinese)
卢辉, 韩建国, 张录达. 高光谱遥感模型对亚洲小车蝗危害程度研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(3): 745–748.
- [3] Li Wenyu, Wang Jinbao, Cheng Xiang' ai, et al. New analysis on laser-induced damage mechanism of array CCD device[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17 (10): 1457–1460. (in Chinese)
李文煜, 王金宝, 程湘爱, 等. 激光对面阵 CCD 器件破坏的一种新机理[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(10): 1457–1460.
- [4] Ni Xiaowu, Lu Jian, He Anzhi. Study of hard-destructive mechanism of the charge-coupled devices by a laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 1994, 43(11): 1795–1802. (in Chinese)
倪晓武, 陆建, 贺安之. 激光对电荷耦合器件硬破坏机理研究[J]. 物理学报, 1994, 43(11): 1795–1802.
- [5] Wang Yanbin, Qi Fengjie, Li Hua, et al. Diffraction effect of entrance pupil by irradiating visible light array CCD with pulsed laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(1): 011009. (in Chinese)
王彦斌, 齐凤杰, 李华, 等. 脉冲激光辐照可见光面阵 CCD 的入瞳衍射效应[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(1): 011009.
- [6] Xu Yin, Sun Xiaoquan, Shao Li. Impact of laser jamming on target detection performance in CCD imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 989–993. (in Chinese)
徐银, 孙晓泉, 邵立. 激光干扰对 CCD 成像系统目标检测性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 989–993.
- [7] Bai Tingzhu, Jin Weiqi. Principle and Technology of Photoelectric Imaging [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006: 214–215. (in Chinese)
白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 214–215.
- [8] Chi Zeying, Chen Wenjian. Applied Optics and Elements of Optical Design [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008: 362–363. (in Chinese)
迟泽英, 陈文建. 应用光学与光学设计基础 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2008: 362–363.