

doi: 10.3788/gzxb20144301.0111003

三波段光学成像系统设计及鬼像分析

郭帮辉^{1,2}, 王健¹, 黄剑波¹, 孙强¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了对目标的多波段辐射特性进行测量,设计了一套 300~1 000 nm 三波段光学成像系统.该系统共用同一入射窗口,采用两个直角棱镜进行分光,每个波段使用独立的光学成像镜头,能同时得到目标的紫外、可见光和近红外图像.利用 LightTools 软件对此系统的鬼像进行模拟分析,发现棱镜表面和窗口玻璃之间的光束多次反射之后,经过光学成像镜头聚焦到探测器靶面上,形成了目标的多重鬼像,大大降低了图像的对比度.实验结果表明:采用本文所述方案,三波段成像系统能达到较好的像质;将窗口玻璃和第一个棱镜的角度控制在 7°之内可以消除鬼像,对使用棱镜作为分光元件的多波段光学成像系统的设计和研制具有一定的参考意义.

关键词:光学设计;光学系统;多波段;光线追迹;杂光;鬼像;成像质量;棱镜;多次反射

中图分类号:TN23;O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)01-0111003-5

Design of Tripleband Optical Imaging System and Analysis of Ghost Image

GUO Bang-hui^{1,2}, WANG Jian¹, HUANG Jian-bo¹, SUN Qiang¹

(1 Changchun Institute of Optic, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

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

Abstract: In order to measure multiband radiation characteristic of objects, a tripleband optical imaging system working in 300~1 000 nm range was designed, which shared the same optical window. In this system, two right-angle prisms were used to split light of different waves, and each band used independent optical lens. This system can obtain images at the same time in the wavebands of ultraviolet, visible and infrared. The ghost image of the system was simulated and analyzed with the help of Lighttools software. It is shown that there are multiple ghost images which reduce the contrast ratio of the images on the surface of detector, because of light multiple reflected between the surfaces of right-angle prism and window. Experimental results show that the tripleband optical imaging system can achieve good image quality, and the ghost images can be cleared away when the angle of the optical window and the first prism is controlled in seven seconds. The efforts of this paper are referable for research and design of multiband optical imaging system using prism to split light.

Key words: Optical design; Optical system; Multiband; Ray tracing; Stray light; Ghost image; Image quality; Prism; Multiple reflections

OCIS Codes: 220.0220; 220.4830; 110.0110; 170.0110; 230.5480

0 引言

由于科技水平的快速发展,近年来,在工业检测等

许多应用场合,对于特定目标光谱辐射特性准确测量的需求越来越紧迫^[1-3].在很多情况下,要求得到目标的紫外(300~380 nm)、可见光(380~760 nm)和近红

基金项目:吉林省科技厅发展计划项目(No. 20125092)和中国科学院院地合作项目(No. 2011CJT0004)资助

第一作者:郭帮辉(1983-),男,助理研究员,博士研究生,主要研究方向为精密光电测量系统. Email: gbhyxl@163.com

导师(通讯作者):孙强(1972-),男,研究员,博士,主要研究方向为精密光电测量系统、红外成像系统. Email: sunqiang_sklao@yahoo.com.cn

收稿日期:2013-05-16;录用日期:2013-08-26

<http://www.photon.ac.cn>

外(760~1 000 nm)三个波段的图像.目前,已有的多波段光学成像系统主要有两种类型^[4-6],一种类型是将多套独立的不同波段的光学系统拼合在一起,从而实现多个波段的成像,设备结构复杂、体积大,不能用于对体积要求严格的场合;另一种类型是采用旋转滤光片的方式来实现多个波段的成像,这种多波段系统在同一时刻只能得到一个波段的图像,无法在同一时刻得到所有波段的图像,不能满足航拍等特殊场合的应用要求.

本文设计了紫外、可见光和近红外三个波段的光学成像系统,该三波段系统共用同一入射窗口,利用两个分光棱镜将不同波段的光束分开,每个波段采用独立的光学成像镜头,既减小了系统体积,又可以在同一时刻获得目标的三个波段的图像,提高了各个波段的成像质量.建立了杂散光分析模型,对系统进行杂散光分析,找到产生杂散光的根源,并采取相应的措施来降低杂散光对成像质量的影响.

1 系统工作原理

本文设计的紫外、可见光和近红外三波段光学成像系统,参量见表1.

表1 主要技术指标

Table 1 Main specifications

Parameter	Value
Field of view/(°)	7.6
Effective focal length/mm	60
$F/\#$	3
Waveband/nm	UV:300~380
	VIS:380~760
	IR:760~1 000
Temperature range/(°C)	-40~+55

光学系统原理如图1.紫外、可见光和近红外三个波段的光学成像系统共用同一入射窗口,采用45°胶合

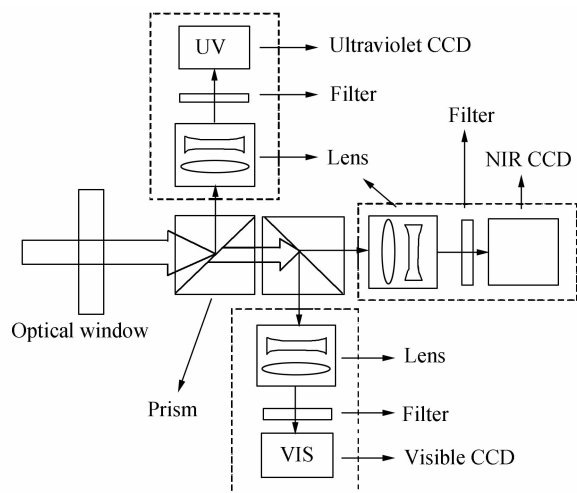


图1 光学系统

Fig. 1 The diagram of optical system

棱镜进行分光,在胶合棱镜的胶合面上镀有针对相应波段的分光膜.入射光束到达第一个棱镜的胶合面时,300~380 nm紫外光被反射,反射率大于90%,被反射的紫外光束经过紫外成像镜头和紫外滤光片,聚焦到紫外CCD靶面,形成目标的紫外图像;380~1 000 nm的可见光和近红外光经过第一个胶合棱镜透射后,到达第二个棱镜的胶合面被反射,反射率大于90%,被光学成像镜头聚焦到可见光CCD靶面,形成目标的可见光图像;760~1 000 nm的近红外光经过第二个胶合棱镜透射后,被近红外光学成像镜头聚焦到近红外CCD靶面,形成目标的近红外图像.

2 光学系统设计

常用光学玻璃的透过率在小于350 nm的紫外波段急剧下降,只有少数光学玻璃在紫外至近红外波段都具有较高的透过率,例如石英和CaF₂.如果本文所述紫外、可见光和近红外三波段光学系统共用同一个光学成像镜头,仅采用石英和CaF₂作为光学玻璃材料,那么,无法校正如此宽波段的色差,导致光学系统成像质量不高.为了提高光学系统的成像质量,采用如图2所示的光路结构,三个波段共用同一入射窗口,使用胶合直角棱镜将不同波段的光束分离,最后针对每个波段设计专用的光学成像镜头,每个镜头仅在相应波段范围内校正像差,能达到非常好的成像效果.

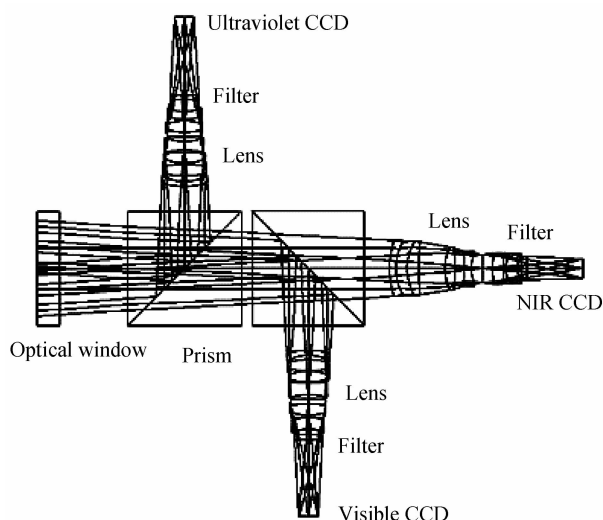


图2 光学系统结构

Fig. 2 Structure of optical system

为了减小整个系统的体积,三个波段的镜头都采用远距结构^[7-10],每个镜头都由六个透镜和一个滤光片组成,被光阑分为前后两组,前组是正透镜组,后组是负透镜组,光学系统的远距比为

$$\alpha = L/f' = 1 + d(1 - \varphi_1) \quad (1)$$

式中 L 是光路长度, f' 是焦距, d 是前后镜组的距离, φ_1 是前镜组的光焦度.

前组和后组的光焦度之间的关系为

$$\varphi_2 = (1 - \varphi_1) / (1 - d\varphi_1) \quad (2)$$

式中: φ_2 是后镜组的光焦度。

系统在 $-40^{\circ}\text{C} \sim +55^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内使用时,由于透镜和镜筒材料的热胀冷缩会改变光学成像系统像面位置^[11-12],另外,物距改变时,像面位置也随之变化,因此,必须对像面位置进行调节,使探测器靶面位置处于像面焦深范围内,才能保证高的成像质量。设计中采用凸轮调焦机构,通过旋转镜头来调节后工作距,从而

实现像面位置调节。

图3是此三波段光学系统在 20°C 时各个波段的光学传递函数曲线,在CCD的奈奎斯特截止频率 100 lp/mm 处,紫外波段的光学调制传递函数MTF (Modulation Transfer Function)大于0.52,可见光波段的MTF大于0.48,近红外波段的MTF大于0.41,都能满足清晰成像的要求。

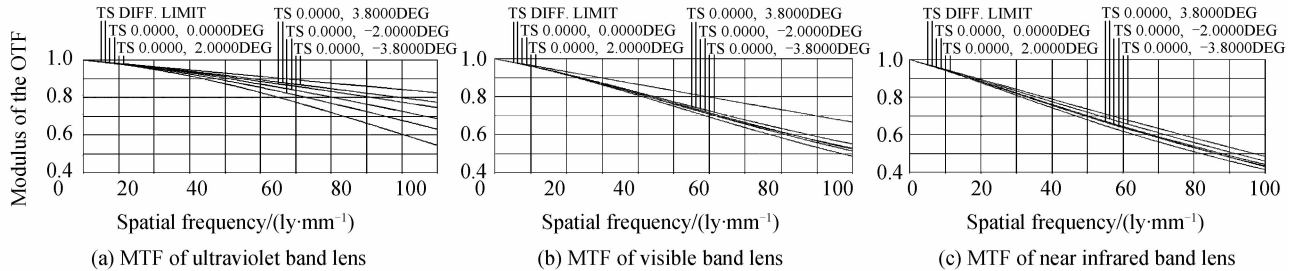


图3 20°C 时光学系统的MTF

Fig. 3 MTF of optical system at 20°C

图4是此三波段光学成像系统实拍图,从图中可以看出,不同波段的目标特征不一样,例如,天空背景

下的烟尘,在近红外波段的对比度最高。

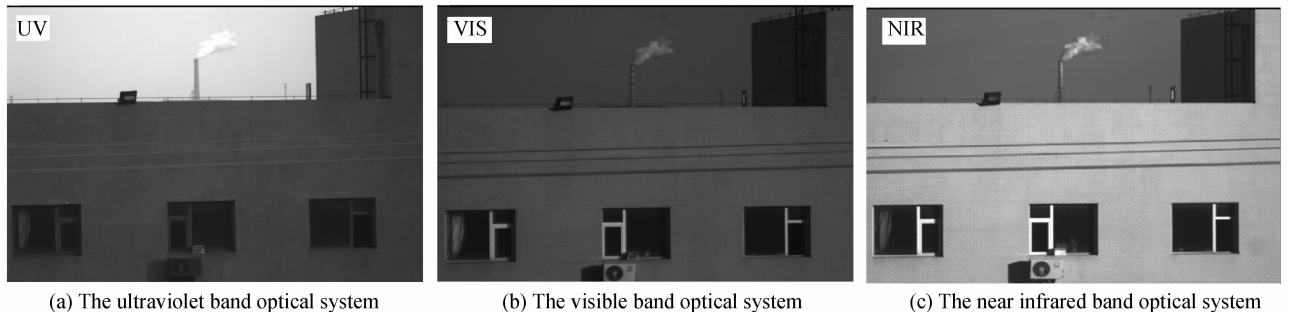


图4 三波段光学成像系统实拍

Fig. 4 Photograph of the tripleband optical system

3 光学系统鬼像分析

在光学成像系统中,进入光学系统入瞳的光束,其中一部分光束按照光学仿真软件设计的传播路径到达探测器靶面,形成目标的图像;另一部分光束则不按照设计的传播路径前进,而是在各个镜片表面或机械镜筒表面多次反射,最终到达探测器靶面。这些经过非正常路径到达探测器靶面的光束称为杂光,杂光会在一定程度上降低目标的对比度^[13-15]。如果杂光刚好会聚在光学系统的像面上,就会产生鬼像,即在目标图像附近形成重影,严重影响光学系统的成像质量。在光学成像系统的设计过程中,一定要采取措施减少系统中的杂光,尤其要避免产生鬼像。

如图2所示的光路结构中,三个波段共用了窗口玻璃和胶合棱镜,由于系统的波段范围是 $300 \sim 1000\text{ nm}$,无法镀如此宽波段的增透膜,因此,窗口玻璃和棱镜表面都未镀增透膜。由于系统的视场角很小,

可以近似认为光线从窗口玻璃和棱镜的表面垂直入射和出射,根据菲涅尔公式可以近似计算表面的反射率。

$$R = \left[\frac{n-1}{n+1} \right]^2 \quad (3)$$

式中, n 为材料折射率,窗口玻璃和棱镜材料为熔融石英, $n=1.458$,计算得到 $R=3.5\%$,实际上,由于加工误差,表面不可能绝对光滑,表面反射率甚至会高达 6% ,因此,光束会在窗口玻璃和棱镜表面之间多次反射,形成杂光。三个波段光学成像镜头中的每个透镜都镀相应波段的增透膜,透过率可以达到 99% ,反射率仅为 1% ,经透镜表面反射之后的杂光能量很低,不用考虑此部分杂光。

图5是利用LightTools软件对本系统进行杂光分析,建立窗口玻璃内表面和棱镜表面之间的多次反射的光线追迹模型。在此模型中,考虑了光束在棱镜各个表面上的反射和透射特性,以及棱镜胶合面分色膜的光谱透过率。此系统的视场角为 $\pm 3.8^{\circ}$,图5中,光束以 1° 入射角进入光学系统,在窗口玻璃和棱镜外表面

之间形成多次反射,由于加工和装调误差,窗口玻璃和棱镜之间不可能绝对平行,在某个方向总存在一定的夹角,光束在这两个表面之间经过多次反射之后,改变了入射角度,然后进入各个波段的光学镜头,聚焦在探测器靶面上,就会形成鬼像.最终的结果是,探测器靶面上有规律地分布着原始图像和各级鬼像,有的鬼像叠加在原始图像上,导致原始图像对比度下降.但是,并不是所有的鬼像对图像的对比度都有影响.由于光束每经过一次反射,其能量变为直接透射光束能量的6.4%,经过二次反射后,能量变为0.41%,四次反射后,能量变为0.002%,四次反射之后的能量很低,几乎不会影响图像质量,可以忽略不计,因此,只需考虑二次反射形成的鬼像.

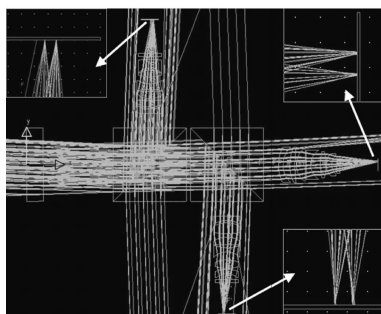


图5 棱镜表面和窗口玻璃多次反射的光线追迹

Fig. 5 Ray trace of light multiple reflected between the surfaces of prism and window

利用此模型进行光线追迹,发现以下现象:

- 1) 当窗口玻璃与棱镜之间平行时,三个探测器靶面上都没有鬼像;
- 2) 当窗口玻璃与棱镜之间的夹角为 θ 时,在三个探测器靶面的入射角为 2θ 的像点处,会出现二次反射的鬼像;
- 3) 棱镜的上下表面反射光线,不能到达探测器靶面,不会引入杂光和鬼像.

4 消除鬼像的措施

通过 LightTools 软件对系统杂光进行分析,针对系统中鬼像产生的途径,提出消除鬼像的措施:提高窗口玻璃和棱镜表面的加工和装调准确度,减小这两个表面的平行度误差,使二次反射产生的鬼像与原始图像的位置差小于一个像素尺寸.经过计算,当两个表面的平行度误差小于 $7''$ 时,即可达到要求.

5 实验分析

采用第4节提到的消除鬼像的方案进行实验.图6(a)、7(a)和8(a)是此系统经过初次装调,窗口玻璃与棱镜表面之间没有调到完全平行时,采集到的紫外波段、可见光波段和近红外波段图像,观察目标是平行光

管中的鉴别率板,从图像中可以看到条形靶标的鬼像,这些鬼像与原始图像重叠在一起,降低了图像的对比度.

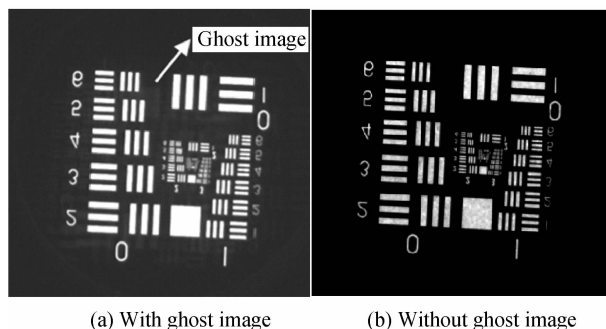


图6 紫外波段图像

Fig. 6 The image of ultraviolet band

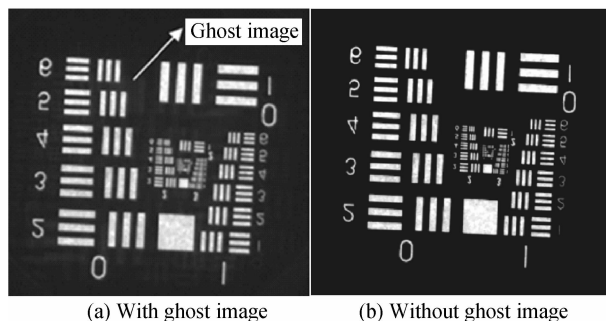


图7 可见光波段图像

Fig. 7 The image of visible band

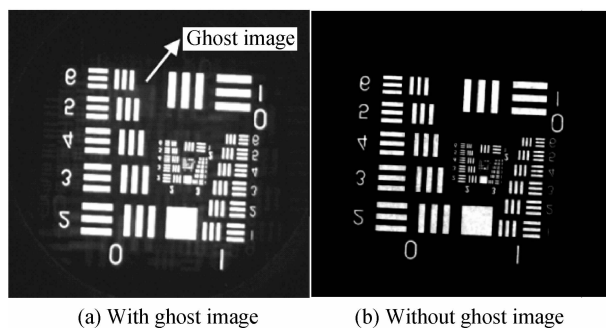


图8 近红外波段图像

Fig. 8 The image of near-infrared band

图6(b)、7(b)和8(b)是采取了本文提出的消除鬼像的措施之后,采集的紫外波段、可见光波段和近红外波段图像,与图6(a)、7(a)和8(a)相比,图6(b)、7(b)和8(b)没有出现鬼像,像面清晰,图像对比度高,因此,将窗口玻璃与棱镜表面之间的夹角控制在 $7''$ 之内,能够消除此系统中的鬼像.

6 结论

本文设计了一套光学成像系统,包含紫外、可见光和近红外三个波段,该系统共用同一入射窗口,通过两个直角棱镜进行分光,每个波段使用独立的光学成像镜头.采用此结构,既减小了系统体积,又提高了各个波段的成像质量.并利用 LightTools 软件建立此系统

的光线追迹模型,分析了光束在窗口玻璃内表面和第一个棱镜表面之间的多次反射所形成的鬼像特征,并提出将窗口玻璃和第一个棱镜的角度控制在 7° 之内的消除鬼像的措施.根据本文的设计方案成功研制了一套三波段光学成像系统,并进行相关实验,实验结果表明,采用本文所述方案,三波段成像系统能达到较好的像质,同时,采取上述措施能够很好地消除鬼像.本文的工作对于使用棱镜作为分光元件的多波段光学成像系统的设计和研制具有一定的参考意义.

参考文献

- [1] QIAN Yi-xian, GAO Xiao-dong, LIANG Wei, *et al.* Design of multi-spectral large format chromatic CCD digital aerial photogrammetric camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2473-2477.
钱义先,高晓东,梁伟,等.多光谱面阵彩色 CCD 数字航测相机设计[J].光子学报,2008,**37**(12): 2473-2477.
- [2] XU Hong, WANG Xiang-jun. Application of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(1): 13-17.
许洪,王向军.多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用[J].红外与激光工程,2007,**36**(1): 13-17.
- [3] WANG Xin-quan, HUANG Min, GAO Xiao-hui, *et al.* Portable multispectral imager based on LCTF [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 71-75.
王全新,黄昊,高晓惠,等.基于液晶可调谐滤光片的便携式多光谱成像仪[J].光子学报,2010,**39**(1): 71-75.
- [4] THEMELIS G, YOO J S, NTZIACHRISTOS V. Multispectral imaging using multiple-bandpass filters [J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(9): 1023-1025.
- [5] WAY S, KERR R, IMAMURA J, *et al.* Design and testing of a dual band enhanced vision system[C]. SPIE, 2003, **5074**: 612-619.
- [6] HE Ying-hong, MA Zhen, ZHAO Bao-chang, *et al.* Optical system design of space sensor with two long focal length lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 3027-3033.
贺应红,马臻,赵葆常,等.实现两档长焦距的空间遥感光学系统设计[J].光学学报,2010,**30**(10): 3027-3033.
- [7] XUE Qing-sheng. Optical design of spaceborne low-distortion and super-wide-angle[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 15-20.
薛庆生.星载超广角气溶胶探测仪均匀像面性光学设计[J].光子学报,2012,**41**(1): 15-20.
- [8] CHEN Chen, LIU Xiao-chan, LI Wei-shan, *et al.* Design of light weight small wide-angle projection lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1266-1269.
陈琛,刘霄婵,李维善,等.轻小型广角投影物镜的设计[J].光子学报,2011,**40**(8): 1266-1269.
- [9] JIANG Yang, SUN Qiang, LIU Ying. A thermal design for IR optical seeker system with wide FOV[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(4): 462-466.
姜洋,孙强,刘英,等.大视场红外导引头光学系统消热差设计[J].光子学报,2013,**42**(4): 462-466.
- [10] BAI Qing-lan, MIAO Xin-hua. Achromatized design of near UV- visible wide-angle objective[J]. *Acta Photonica Sinica*, **2004**, **33**(11): 1331-1335.
白清兰,苗兴华.消色差的近紫外-可见光广角物镜设计[J].光子学报,2004,**33**(11): 1331-1335.
- [11] CHEN Hong-Da, CHEN Yong-he, SHI Ting-Ting, *et al.* Error analysis for focusing mechanism of space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(5): 1349-1356.
陈洪达,陈永和,史婷婷,等.空间相机调焦机构误差分析[J].光学精密工程,2013,**21**(5): 1349-1356.
- [12] LIU Lei. Focusing range of space off-axial TMA optical camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(3): 631-636.
刘磊.空间三反相机调焦范围的确定[J].光学精密工程,2013,**21**(3): 631-636.
- [13] LIAO Zhi-bo, JIAO Wen-chun, FU Ru-i min. Veiling glare index calculation for refract optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 424-427.
廖志波,焦文春,伏瑞敏.透射式光学系统杂光系数计算方法[J].光子学报,2011,**40**(3): 424-427.
- [14] ZHANG Hong-xin, LU Zhen-wu, SUN Qiang, *et al.* Stray light analysis of diffractive /refractive LW IR staring imaging system[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(5): 402-407.
张红鑫,卢振武,孙强,等.折/衍混合长波红外凝视成像系统的杂散光分析[J].中国光学与应用光学,2009,2(5): 402-407.
- [15] ZHANG Jun-qiang, WU Qing-wen, YAN Chang-xiang. Stray light measurement of space-borne high resolution imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1319-1323.
张军强,吴清文,颜昌翔.星载成像光谱仪杂散光测量 [J].光子学报,2010,**39**(7): 1319-1323.