

文章编号 1674-2915(2010)05-0474-06

300 ~1 100 nm 多波段成像光学系统设计及杂光分析

郭帮辉^{1,2}, 孙强¹, 王志¹, 王健¹, 吴宏圣¹, 刘殿双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 研究生院, 北京 100039)

摘要: 设计了一套 300 ~1 100 nm 多波段光学系统, 该系统能对目标的近紫外、可见光和近红外 3 个波段同时成像, 可满足目标多波段信息探测的要求。由于在光学系统中镜筒内壁反射和棱镜表面反射会产生杂光和鬼像, 因此, 利用 Light-Tools 软件对此系统的杂光和鬼像进行了模拟分析。模拟结果表明, 视场之外 $11.7 \sim 18.3^\circ$ 和 $-11.7 \sim -18.3^\circ$ 的入射光线被胶合棱镜上下表面反射后, 会聚焦到 3 个探测器靶面范围内, 形成鬼像; $6.2^\circ \sim 9.8^\circ$ 和 $-6.2^\circ \sim -9.8^\circ$ 的入射光线被镜筒反射后会在 3 个探测器上形成杂光。利用设计的多波段光学系统进行了相关实验, 结果证明了模拟分析的正确性, 表明此分析能用于指导多波段光学系统的设计和研制。提出了减少杂光和鬼像的相应措施, 实验结果验证了提出的措施能够减少杂光及消除鬼像, 提高系统成像质量。

关键词: 多波段光学系统; 杂光; 鬼像; 成像质量

中图分类号: TN23; TH703 文献标识码: A

Design of 300 - 1 100 nm multiband optical imaging system and its stray light analysis

GUO Bang-hui^{1,2}, SUN Qiang¹, WANG Zhi¹, WANG Jian¹, WU Hong-sheng¹, LIU Dian-shuang¹

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

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: A multichannel optical system working in 300 - 1 100 nm was designed to detect the information of objects in the multi-band, which could obtain images at the same time in the near ultraviolet, visible and near infrared ranges. As the system was easy to produce stray light and ghost images due to reflecting of barrel and

收稿日期: 2010-05-13; 修订日期: 2010-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60507003, No. 60977001); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA12Z110); 吉林省科技发展计划杰出青年基金资助项目

prism, the stray light and ghost images were simulated and analyzed with the help of Light Tools software. From the simulation results, it is shown that the incidences out of the field in the range of $11.7^\circ - 18.3^\circ$ and $-11.7^\circ - -18.3^\circ$ can be reflected by the up and down surfaces of the prism, and then be focused on the image surfaces of the three detectors to form the ghost images; the incidences in the range of $6.2^\circ - 9.8^\circ$ and $-6.2^\circ - -9.8^\circ$ can be reflected by the barrel to form stray lights. The analyzed result was approved by the image achieved from the multichannel system, and it indicates that the analysis is a contribution to design and manufacture of multichannel system. Several kinds of methods to decrease the stray lights and ghost images was proposed and they have been proved to be effective.

Key words: multichannel optical system; stray light; ghost image; imaging quality

1 引言

在工业检测和国防军事应用领域,为了对目标进行准确探测,除了要求得到目标的可见光图像之外,还需要得到目标的近紫外和近红外图像^[1-3]。如果将多套光学系统拼合在一起来实现多波段成像^[4],系统体积大,结构复杂,机动性能差,在战场上容易被敌方发现。为了满足对目标多波段信息进行探测的要求,本文设计了300 ~ 1 100 nm多波段成像仪,该成像仪能对目标的近紫外、可见光和近红外3个波段进行成像,同时获得目标在3个波段的光谱信息,能够满足目标多波段成像和探测的要求。

为了减小系统体积,在光学系统设计中,令3个波段共用一个光学孔径,然后利用胶合棱镜进行分光,采用面阵CCD探测器进行成像,从而减小了系统体积和复杂程度,能用于对系统体积、重量和机动性能要求严格的场合。不过由于系统中胶合棱镜的分色膜和表面反射,该系统容易引入杂光,甚至会在像面上形成鬼像,从而降低系统成像质量。为了减小杂光对系统成像质量的影响,本文建立了杂光分析模型,对系统进行杂光分析,找到了杂光来源,并采取合适的措施降低了杂光的影响。

2 工作原理

本文设计并研制了一套300 ~1 100 nm多波段光学系统,其参数如表1所示。

表1 主要技术指标

Tab.1 Main specifications

	参数
视场角	$\pm 3.5^\circ$
焦距	65 mm
相对孔径	1/4
工作波段	近紫外:300 ~380 nm 可见光:380 ~760 nm 近红外:760 ~1 100 nm
使用温度	-40 ~ +60

光学系统原理如图1所示。近紫外、可见光和近红外波段共用同一透镜组,然后采用胶合棱镜进行分光,在棱镜的胶合面上镀有分色膜,用于反射和透射不同波段的光束。入射光束经过透镜组之后,到达棱镜第一胶合面时,近紫外波段被反射,聚焦到紫外探测器靶面,形成近紫外图像;同时,波长 >380 nm的可见光和近红外光被透射,

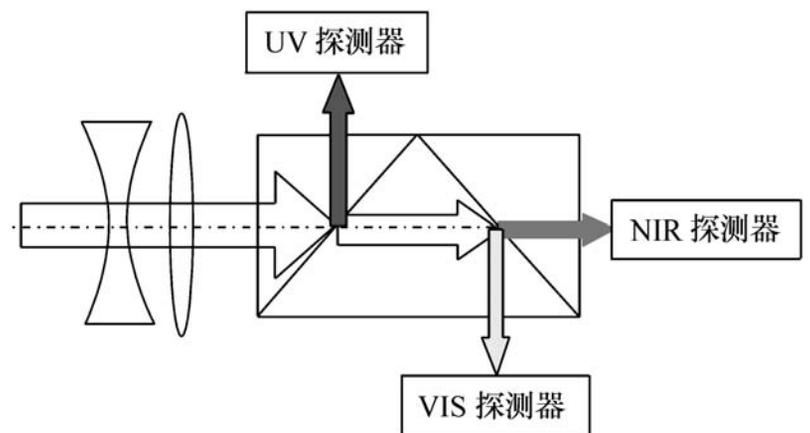


图1 光学系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of optical system

到达棱镜第二胶合面时,可见光被反射,聚焦到可见光探测器靶面,形成可见光图像;波长 $> 760\text{ nm}$ 的近红外光被棱镜第二胶合面透射,聚焦到近红外探测器靶面,形成近红外图像。

3 光学系统设计

多波段光学系统的波长为 $300 \sim 1\ 100\text{ nm}$, 适合于这个波段的透镜材料比较少,常用的材料有 CaF_2 和熔融石英,这给宽波段范围的色差校正带来一定困难。在进行光学系统设计时,为了减小系统的色差,根据色差平衡方程组,选择了色散小的 CaF_2 作为正透镜,色散大的熔融石英作为负透镜。由于 CaF_2 易潮解,故在透镜表面镀一层保护膜。

由于系统采用棱镜进行分光,从而增加了透镜组后表面到像面之间的距离,因此,光学系统采用了反远距结构形式,以满足长的后工作距要求。

由于本系统可在 $-40 \sim +60$ 使用,不仅温度范围宽,而且作用距离变化也大,要想获得高的成像质量,必须对系统像面进行调节。由于本系统中有3个成像探测器,若移动探测器会增加结构复杂度,因此,采用移动一片透镜的方法进行温度和距离调焦补偿,使3个波段在温度和物距变化时都能清晰成像。

图2为多波段系统光路图,透镜1~6组成反远距结构透镜组,其中透镜1和2组成前负透镜组,透镜3~6组成后正透镜组,光阑位于透镜4和5之间。近红外滤光片用于滤除波长

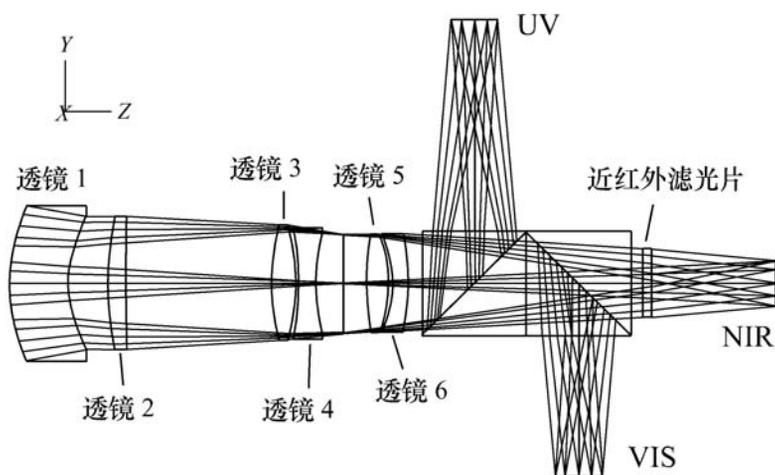
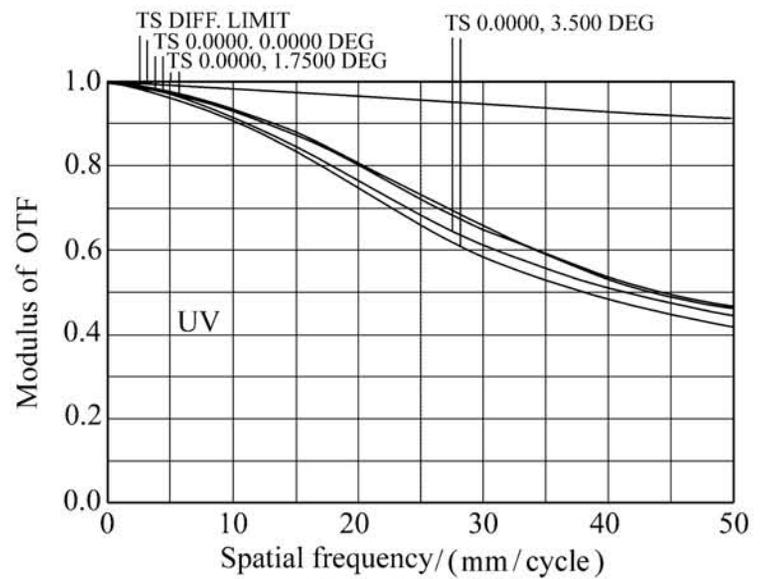


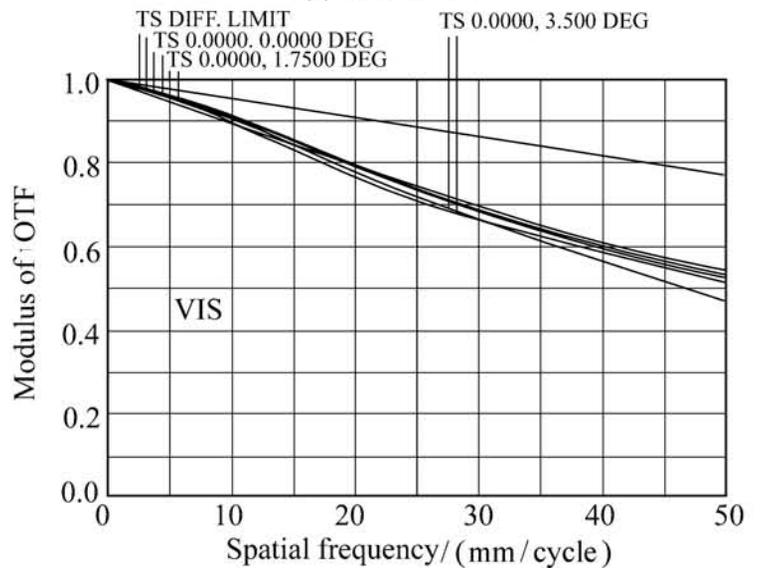
图2 光学系统结构图

Fig. 2 Structure of optical system

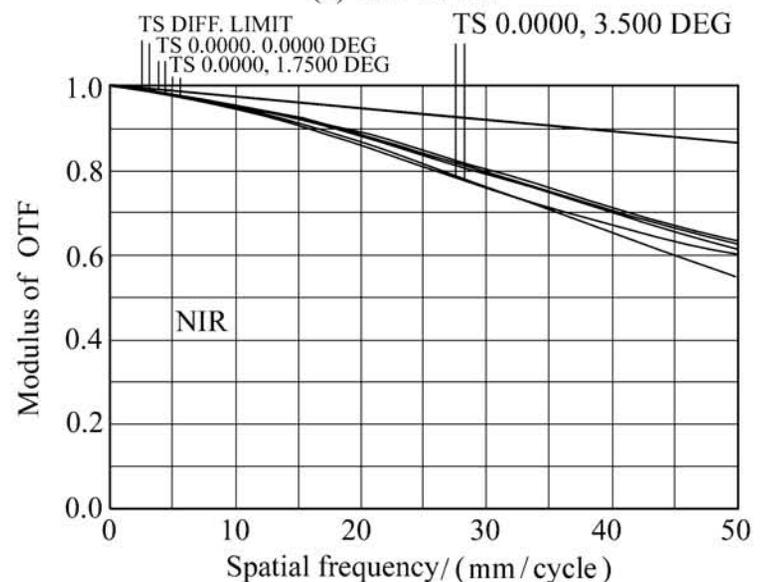
$> 1\ 100\text{ nm}$ 的光束,以确保近红外波段的准确性。通过移动透镜2微量调节焦距,可以对温度和物距变化时的像面位置进行补偿,透镜2移动量在 $\pm 1.8\text{ mm}$ 。



(a) 紫外波段的 OTF
(a) OTF in UV



(b) 可见光波段的 OTF
(b) OTF in VIS



(c) 近红外波段的 OTF
(c) OTF in NIR

图3 光学系统的 MTF

Fig. 3 MTFs of optical system

图3为系统3个波段的传递函数曲线,在 50 lp/mm 时,近紫外波段的 $\text{MTF} > 0.4$,可见光波

段的 $MTF > 0.46$, 近红外波段的 $MTF > 0.55$, 均能满足清晰成像的要求。

4 光学系统杂光分析

杂光是指非正常传输到光学系统像面的光, 当杂光在像面聚焦时, 会形成鬼像, 严重影响成像质量^[5,6]。杂光主要是由光学元件、机械镜筒表面的反射和散射产生^[7]。在多波段系统中, 主要考虑胶合棱镜表面反射和镜筒内壁反射产生的杂光。

4.1 棱镜上下表面的反射

当棱镜表面没有镀增透膜时, 根据菲涅尔公式可以近似计算棱镜表面的反射率:

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

式中, n 为材料折射率, 棱镜材料为熔融石英, $n = 1.458$, 计算得到 $R = 3.5\%$ 。

棱镜的长度为 36 mm, 一定角度的入射光线经过前面 6 片透镜, 可能到达棱镜的上下表面, 发生一次反射, 进入探测器靶面范围, 形成杂光。由于棱镜表面的反射率高达 3.5%, 形成的杂光强度很大, 严重影响像质。

图 4 是利用 LightTools 软件建立的棱镜内表面反射的光线追迹模型。在模型中, 考虑了镜筒内表面的反射, 棱镜上下表面的反射, 以及棱镜胶合面分色膜曲线的反射和透射特性。此系统的视场角为 $\pm 3.5^\circ$; 图 4 中, 光束以视场之外的 15° 入

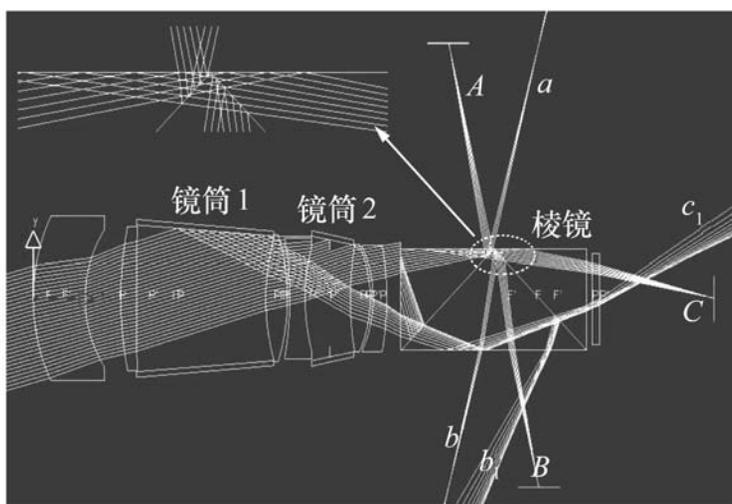


图 4 棱镜内表面反射的光线追迹图

Fig. 4 Ray trace of light reflected from inner surface of prism

射角进入光学系统, 经过透镜 1 和透镜 2, 一部分光线被透镜 2 和透镜 3 之间的镜筒 1 反射, 此部分反射光线到达棱镜下表面, 反射形成光束 b_1 和 c_1 , 在可见光和近红外靶面之外, 不会影响成像质量; 另一部分光线透过前 6 片透镜, 到达棱镜上表面被反射, 形成光束 A 、 B 和 C 分别聚焦到 3 个探测器靶面范围内, 形成鬼像。

利用此模型进行光线追迹, 发现 $11.7 \sim 18.3^\circ$ 和 $-11.7 \sim -18.3^\circ$ 的入射光线, 透过前 6 片透镜后, 被棱镜上下表面反射, 杂光在 3 个探测器靶面范围内聚焦形成鬼像。

4.2 镜筒内表面的反射

通常光学系统的镜筒内表面要加工消光螺纹, 并进行发黑处理, 以降低镜筒内表面的反射系数。但是采取这些处理方式也不能保证到达镜筒内壁的光线能被完全吸收。

图 5 是镜筒内表面反射的光线追迹图。光束以 7.5° 入射到达镜筒 1, 被镜筒 1 反射后, 到达棱镜下表面, 再被棱镜下表面反射形成杂光束 Y 和 Z , 进入可见光和近红外探测器靶面范围内, 光束 Y 和 Z 在靶面上未聚焦, 因此不会形成鬼像, 但是形成的杂光会降低成像清晰度。

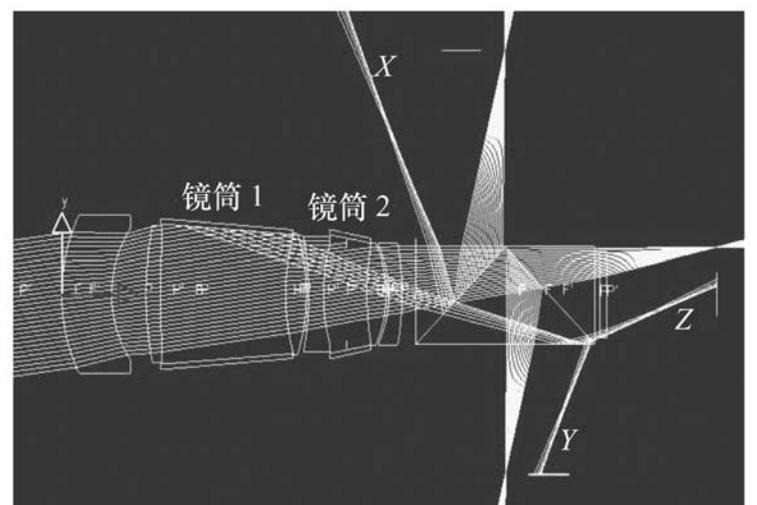


图 5 镜筒内表面反射的光线追迹图

Fig. 5 Ray trace of light reflected from inner surface of barrel

利用此模型进行光线追迹, 发现 $6.2 \sim 9.8^\circ$ 和 $-6.2 \sim -9.8^\circ$ 的入射光线被镜筒 1 反射, 然后被棱镜上下表面反射, 在 3 个探测器上形成杂光。从此模型可以看出入射光线容易在镜筒 1 反射形成杂光, 而不会在镜筒 2 反射。主要是因为镜筒 1 的长度为 26 mm, 而镜筒 2 的长度为 8 mm, 镜筒

长度越长,入射光线越容易在内表面反射到达靶面范围内形成杂光。

4.3 减少杂光的措施

通过以上分析,针对杂光产生的途径,提出以下减少杂光的措施:

(1) 在棱镜上下表面和左右表面镀增透膜,使透过率达 99% 以上。从以上光线追迹分析可以看出,杂光及鬼像都是经过棱镜上下表面的一次反射形成的,在上下表面镀 99% 透过率的增透膜之后,棱镜表面反射率低于 1%,能大大减小杂光和鬼像的能量。在棱镜入射和出射的左右表面镀增透膜,能减少左右表面的反射引入的杂光。

(2) 在镜筒内表面加工消光螺纹,并且进行发黑处理,同时涂消光漆,处理之后,镜筒内壁的反射率大大降低,减少了镜筒内壁反射引入的杂光。如果可能的话,光学设计时应尽量缩短镜片之间的距离,使镜筒尽量短,这样由镜筒一次反射到达像面的杂光就会减少。

(3) 在镜头前加遮光罩。通过以上杂光分析,已经得到杂光和鬼像的入射角范围,在镜头前加遮光罩,可以挡住视场之外的光线,使其不能直接进入光学系统,从而大大减小系统的杂光。在遮光罩内表面加工消光螺纹,进行发黑处理,减小由于遮光罩内表面反射进入系统的光线能量。

为尽最大可能减少系统杂光,最好在光学系统中同时采取以上 3 种措施。

5 实验分析

本部分对以上杂光和鬼像分析进行了实验验证,并采用了以上提到的消杂光方案进行实验。

图 6 是未采取消杂光措施采集的近红外波段图像,目标是建筑物的墙壁和窗户,从图中很容易看到窗户产生的鬼像。与周围景物对比,找到鬼像对应的目标,利用测角仪测量,发现左上角的窗户白色框架鬼像对应的目标位于光学系统轴外 17.2° 附近,与 3.1 节中的鬼像分析相吻合。同时,可以看出,图像比较模糊,对比度不高,说明系统除了鬼像之外,还有其他类型的杂光到达像面。

图 7 是采取了上文提出的消杂光 3 个措施之

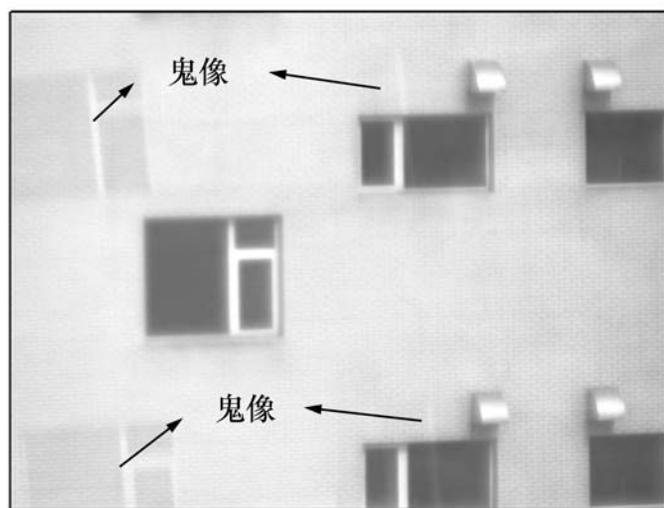


图 6 有杂光及鬼像的近红外图像

Fig. 6 Near infrared image with stray light and ghost image

后,采集的近红外波段图像,目标与图 6 一致。与图 6 相比,图 7 不仅没有鬼像,而且像面更加清晰,说明采取消杂光措施之后,杂光的影响得到遏制,在很大程度上提高了成像质量。

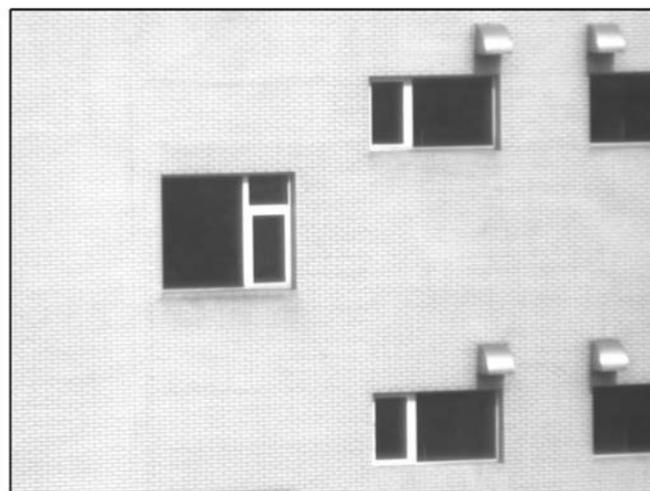


图 7 采取消杂光措施之后的近红外图像

Fig. 7 Near infrared image without stray light and ghost image

6 结论

本文设计了 300 ~ 1 100 nm 多波段(包含近紫外波段、可见光波段和近红外波段)光学系统,该系统共用同一透镜组,使用胶合棱镜进行分光。利用 LightTools 软件对此多波段系统的镜筒反射和棱镜表面反射产生的杂光和鬼像进行模拟分析,并通过实验对模拟结果进行验证。实验结果表明,杂光和鬼像使成像质量大大降低,证明了以上模拟分析的正确性,以及提出的消杂光措施是

切实可行的。本文的工作对于使用棱镜作为分光元件的多波段系统的设计和研制具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 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.
XU H, WANG X J. Application of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military[J]. *Infrared Laser Eng.*, 2007, 36(1):13-17. (in Chinese)
- [2] 张伟,李克新,武春风,等.多光谱目标探测的波段选择[J].光学技术,2005,31(6):893-897.
ZHANG W, LI K X, WU CH F, *et al.*. Wavelength bands selection method of multispectral target detection[J]. *Opt. Technique*, 2005, 31(6):893-897. (in Chinese)
- [3] 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.
QIAN Y X, GAO X D, LIANG W, *et al.*. Design of multi-spectral large format chromatic CCD digital aerial photogrammetric camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(12):2473-2477. (in Chinese)
- [4] WAY S P, KERR R, IMAMURA J J, *et al.*. Design and testing of a dual band enhanced vision system[J]. *SPIE* 2003, 5074:612-619.
- [5] 方丽,林峰,邱怡申. ASAP 模拟变焦系统中鬼像的研究[J].应用光学,2009,30(6):958-963.
FANG L, LIN F, QIU Y SH. Simulation of ghost images in zoom system by ASAP[J]. *J. Appl. Opt.*, 2009, 30(6):958-963. (in Chinese)
- [6] 耿安兵.光学系统的鬼像分析及快速计算方法[J].舰船光学,2004,40(4):34-36.
GENG A B. Analysis and calculation for the ghost in optical system[J]. *Ship Optical*, 2004, 40(4):34-36. (in Chinese)
- [7] 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.
ZHANG H X, LU ZH W, SUN Q, *et al.*. Stray light analysis of diffractive /refractive LW IR staring imaging system[J]. *Chinese J. Opt. and Appl. Opt.*, 2009, 2(5):402-407. (in Chinese)

作者简介:郭帮辉(1983—),男,湖北鄂州人,博士研究生,研究实习员,主要从事光学系统设计方面的研究。

E-mail: gbhyxl@163.com