

反激光探测红外双波段光学系统设计

陈 阳¹, 张安锋², 茹志兵²

(1. 西安工业大学 光电工程学院 光电信息技术研究所, 陕西 西安 710021;
2. 西安应用光学研究所 总体五部, 陕西 西安 710065)

摘 要: 针对激光主动探测技术对光电设备的威胁, 提出了通过光敏面倾斜设计来改变激光回波偏转角, 从而提升系统反激光主动探测性能的方法。设计了一款光敏面倾斜为 5° 的中/长波双波段反激光探测光学系统, 利用自由曲面校正了光敏面倾斜引入的像差。所设计的系统工作波段为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$, $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 。视场角为 $\pm 2.4^\circ$, F 数为 2。设计结果表明, 在奈奎斯特频率 $17\ \text{lp/mm}$ 处, 两个波段传递函数均高于 0.38, 满足红外系统对成像质量的要求。通过反追光迹分析得出系统的被探测距离得到有效降低。

关键词: 双波段; 自由曲面; 反激光探测

中图分类号: TN214 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0918002

Design of infrared dual band optical system based on anti-laser detection

Chen Yang¹, Zhang Anfeng², Ru Zhibing²

(1. Institute of Optical Information Technology, School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. Fifth Department of Total Technology, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aiming at the threat of laser active detection technology to electro-optical devices, a method using photosensitive surface inclined design to reduce the laser echo energy was proposed, so as to improve the system performance of anti-laser detection. A middle and long wave dual band infrared anti-laser detection optical system was designed whose photosensitive surface inclined 5° . The aberration of the photosensitive surface was corrected by using the free-form surface. The designed system operating band was $3\sim 5\ \mu\text{m}$, $8\sim 12\ \mu\text{m}$. The field angle was $\pm 2.4^\circ$, the number of F was 2. This result shows that the transmission function of the two bands is higher than 0.38 at the frequency of $17\ \text{lp/mm}$ of Nyquist, which satisfies the requirement of imaging quality of infrared system. Then, through the anti-chase track analysis, the detection distance of the system is effectively reduced.

Key words: dual-band; free-form surfaces; anti-laser detection

收稿日期: 2017-01-07; 修订日期: 2017-02-10

基金项目: 陆军装备预研项目

作者简介: 陈阳(1986-), 男, 博士生, 主要从事光学设计理论及技术方面的研究。Email: 867549558@qq.com

导师简介: 高明(1964-), 男, 教授, 博士, 主要从事光学设计理论及技术, 光电精密测试技术光大气传输理论及技术方面的研究。

Email: 13629297903@163.com

0 引言

在各类军用光电观瞄、侦察及跟踪武器系统中,其所用光学镜头的焦平面处都安装有反射或半反射元件(光敏面或分划板),在受激光照射时就会产生按原路返回的准直反射光,反射光强度通常比漫反射目标的回波强 $10^2 \sim 10^4$ 倍,这种现象就好像黑夜中看到的猫的眼睛一样,因此称为“猫眼”效应,这些光电装备称为猫眼目标^[1]。近年来,基于猫眼效应的激光主动探测技术在军事上得到了广泛应用,其速度快、定位准,对光电武器平台构成了巨大威胁。目前,世界各军事强国竞相开展反激光主动探测的研究,以避免造成光电装备迷盲、失控和失效。反激光主动探测的方式主要有离焦、镀膜、利用圆孔阵列和磁致旋光效应等^[2-5]。

然而,采用离焦的光学设计方法不可避免地会降低系统的成像质量。采用新材料及介质薄膜的方法会使系统的透过率下降。采用蜂窝式遮光罩及圆孔阵列的光强调制的结构设计方法,对于降低光电装备的激光回波功率的能力有限,且降低了进入原光学系统的能量。采用法拉第效应的磁致旋光方法,需要增加额外的隐身装置,难以实现当今战场应用对系统小型化和轻型化的要求。

在此背景下,文中提出了通过光敏面倾斜提升系统反激光主动探测能力的方法,该方法能够从根本上降低光电侦察设备的“猫眼”效应,基本不影响进入系统的能量,通过加入自由曲面,能够保证光学系统整体成像质量良好。

1 原理及理论

1.1 基于光敏面倾斜的反“猫眼”原理

对于普通光电侦察设备,入射的(主要为中心视场)探测激光被系统的光敏面反射后,将按原光路返回,激光主动探测设备接收相应的激光回波,从而探测到该系统。文中研究的反激光主动探测的光学系统,在设计时将光敏面倾斜一定的角度,由于光敏面和入射光线之间存在夹角,使得激光回波不能按原路返回,激光回波在传播一定距离后将偏离出探测设备的范围,由此实现了光学系统反激光探测的目的,图 1(a)、(b)给出了普通光学系统和光敏面倾斜光学系统的激光回波光路对比图。

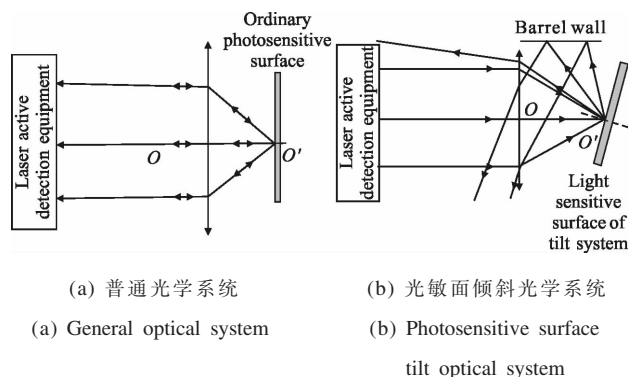


图 1 反激光主动探测原理图

Fig.1 Schematic of anti-laser active detection

利用几何光学知识可以推导出,光敏面倾斜角度与被探测距离之间的关系。根据反射定律,当光敏面倾斜角度为 θ 时激光回波相对入射光线的夹角为:

$$\theta'_i = \begin{cases} 2\theta_i + 2\theta & (\theta_i \leq \theta) \\ 2\theta_i - 2\theta & (\theta_i > \theta) \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ'_i 为经光敏面反射后激光回波与光轴夹角; θ_i 为入射激光与光轴夹角。

结合系统角放大率关系,可算得从系统出射的激光回波角度为:

$$\theta_o = \frac{\theta'_i}{\gamma} \quad (2)$$

式中: γ 为系统角放大率; θ_o 为出射激光回波与光轴夹角。

若系统不能被激光主动探测设备到,则激光回波在传播距离 L 后,其相对于探测设备的偏离量 ΔS 应大于被探测设备口径 D_r ,探测设备的口径 D_f 及光束发散口径 D_d 三者之和为 D ,因此系统不能被探测到的距离应满足下式:

$$\Delta S_{\min} = L_{\min} \cdot \tan \Delta \theta_o > D_r + D_f + D_d \quad (3)$$

式中: $D_d = L \cdot \tan(\Delta \theta)$, $\Delta \theta$ 为从被探测系统出射时激光回波的发散角,利用上式可计算出,倾斜角度为 θ 时,系统的被探测距离,从而对系统的反激光主动探测性能进行评价。

1.2 光敏面倾斜像差校正原理

与一般系统相比,光敏面倾斜系统的像差校正更困难,主要是由于光敏面的倾斜,导致系统在 Y 方向上各视场的像差不一致,如图 2(a)所示,使系统在各个面产生的像差具有了空间性和方向性。系统倾斜的像差分析应将波前像差展开成矢量形式,运用矢量像差理论进行分析。根据三阶像差多项式和倾斜偏心元件对像差的影响,可得倾斜或偏心光学系统在第 i 个面上产生的三阶波像差矢量表达式如下^[6-7]:

$$W_i = W_{010r}(r \cdot r)^2 + W_{131r}[(H - S_i) \cdot r](r \cdot r) + W_{222}[(H - S_i) \cdot r]^2 + W_{220}[(H - S_i) \cdot (H - S_i)](r \cdot r) + W_{313}[(H - S_i) \cdot (H - S_i)][(H - S_i) \cdot r] \quad (4)$$

式中： H 和 r 为没有倾斜和偏心时系统归一化的场点和入瞳处孔径点的矢量形式； S_i 为像差场 W_i 中心相对于共轴旋转对称系统像差场中心的偏离。

针对上述问题，文中采用在系统中加入自由曲面的方法，通过非旋转对称的自由曲面对系统在 Y 方向上像差的不一致进行校正，其原理如图 2(b)所示。

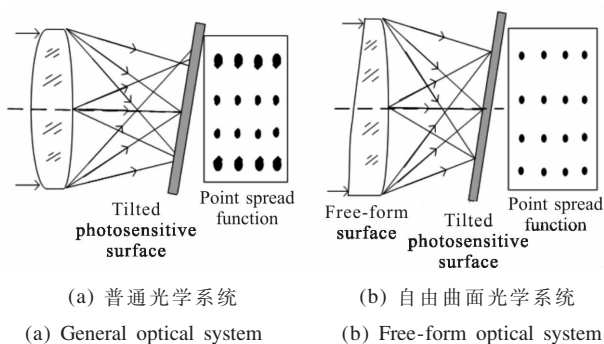


图 2 自由曲面校正系统倾斜像差原理图

Fig.2 Schematic diagram of free-form surface correction system inclination

在各类自由曲面中， XY 多项式自由曲面形式简单，且通过多项式的系数即可控制面型的非对称性，理论上能够有效地校正光敏面倾斜引入的误差，因此，文中拟采用 XY 多项式自由曲面^[8-9]，其表达式如公式(5)所示：

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=2}^N C_i x^m y^n \quad (5)$$

式中： Z 表示 Z 方向上的矢高； c 表示曲面顶点处出的曲率； k 为圆锥曲面常数； r 为曲面上点相对于旋转对称轴的距离； C_i 为多项式系数； N 为展开式项数； m, n 为幂级数， $i = [(m+n)^2 + m + 3n] / 2 + 1$ 。

上式由两部分组成：第一项描述的是 Conic 曲面，第二项为 XY 多项式在笛卡尔坐标系下描述的自由曲面型：

$$\sum_{i=2}^N C_i x^m y^n = C_2 x^1 y^0 + C_3 x^0 y^1 + C_4 x^2 y^0 + C_5 x^1 y^1 + C_6 x^0 y^2 + \dots + C_N x^m y^n \quad (6)$$

2 系统性能及指标

系统探测器采用法国 Sofradir 公司生产的红外双色焦平面阵列，其像素数为 384×288 ，像元大小为 $30 \mu\text{m}$ ，峰值波长为 $4.85 \mu\text{m}$ 。系统具体参数如表 1

所示。

表 1 系统参数表

Tab.1 System parameter table

Parameters	Indexes
Band/ μm	3-5 8-12
Focal/mm	102 99.7
Field/($^\circ$)	± 2.4
System aperture/mm	50
Photosensitive-surface inclination angle/($^\circ$)	5

3 设计结果及性能评价

3.1 设计结果

最终设计的系统共有五片透镜，材料为三片锗(Ge)和两片硫化锌(ZnS)，系统总长为 266 mm。在系统第四片透镜加入自由曲面，口径为 15 mm，在第五片透镜加入衍射面。系统最终结构如图 3 所示，系统结构参数如表 2 和表 3 所示。

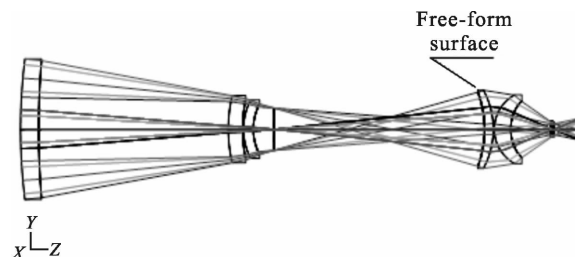


图 3 系统结构图

Fig.3 System structure diagram

表 2 系统结构参数表

Tab.2 System structure parameters table

Radius/mm	Thickness/mm	Glass
269.527	8.671	GERMANIUM
415.672	90.488	
69.501	6.864	GERMANIUM
74.055	0.381	
29.670	4.681	ZNS_BROAD
INFINITY	9.904	
-48.820	100.536	
-39.340	4.110	GERMANIUM
18.659	0.500	
28.339	7.865	ZNS_BROAD
INFINITY	19.132	
INFINITY	0.820	GERMANIUM
INFINITY	0.272	
INFINITY	0.191	GERMANIUM
INFINITY		

表 3 自由曲面系数表

Tab.3 Free-form surface coefficient

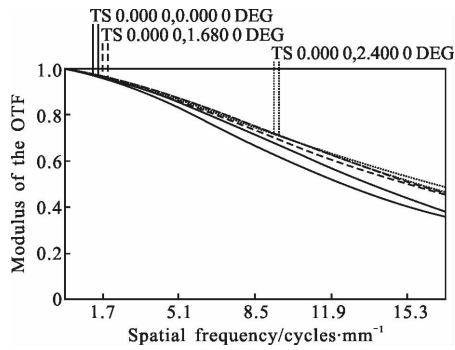
X_1Y_0	X_0Y_1	X_2Y_0	X_1Y_1	X_0Y_2	X_3Y_0	X_2Y_1	X_1Y_2	X_0Y_3	X_1Y_0
6.86E-005	-7.58E-004	-0.015	0.02E-008	-0.017	0	0.016	5.653E-003	6.797E-003	0.013
X_3Y_1	X_2Y_2	X_1Y_3	X_0Y_4	X_3Y_0	X_4Y_1	X_3Y_2	X_2Y_3	X_1Y_4	X_1Y_5
-5.83E-008	0.040	-4.679E-007	0.022	2.454E-005	0.016	4.122E-006	-2.397E-003	5.405E-007	1.476E-004

3.2 系统像质评价

由于光敏面倾斜, 导致系统正、负视场不再对称, 因此分别给出系统正视场及负视场的传递函数图。中波红外波段传递函数如图 4 所示, 由图可知,

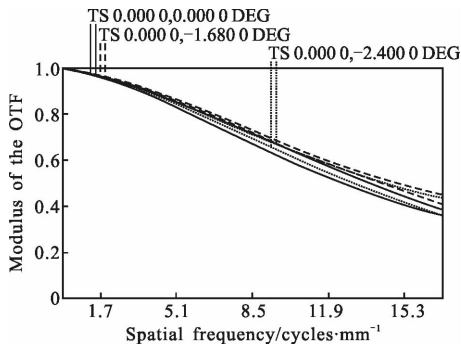
无论是在正视场还是负视场, 在空间频率 17 lp/mm 处, 系统传函均高于 0.38, 满足了一般红外系统的成像需求。此外, 由畸变/场曲图可以看出, 系统畸变量在 $\pm 2\%$ 范围以内。

长波红外波段传递函数如图 5 所示, 由图可知,



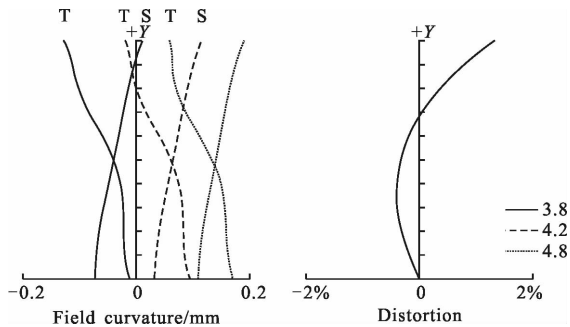
(a) 正视场 MTF 图

(a) Positive field of view MTF



(b) 负视场 MTF 图

(b) Negative field of view MTF

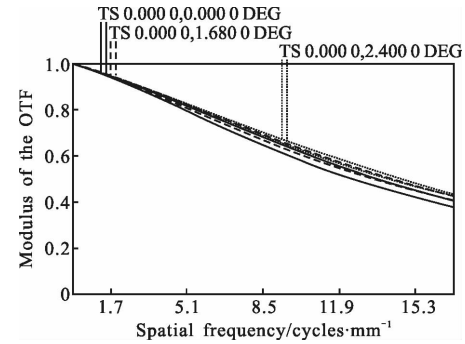


(c) 场曲/畸变图

(c) Field curvature/distortion map

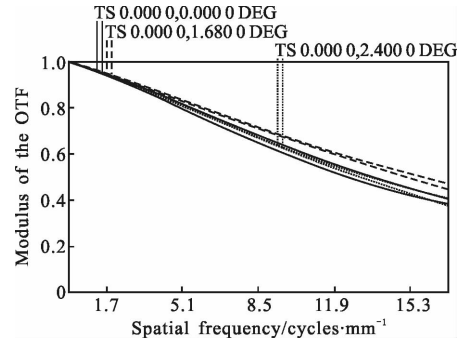
图 4 中波红外像质图

Fig.4 MWIR image quality map



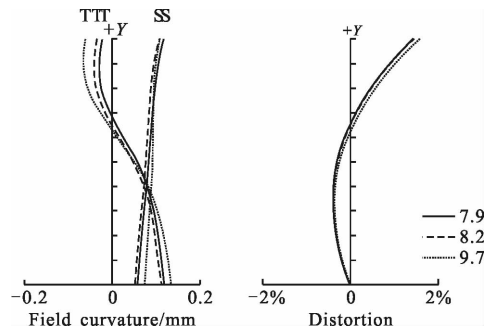
(a) 正视场 MTF 图

(a) Positive field of view MTF



(b) 负视场 MTF 图

(b) Negative field of view MTF diagram



(c) 场曲/畸变图

(c) Field curvature/distortion map

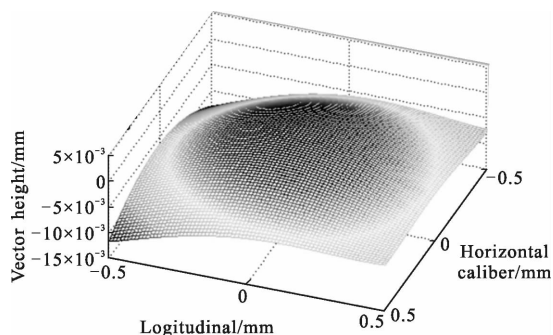
图 5 长波红外像质图

Fig.5 LWIR image quality map

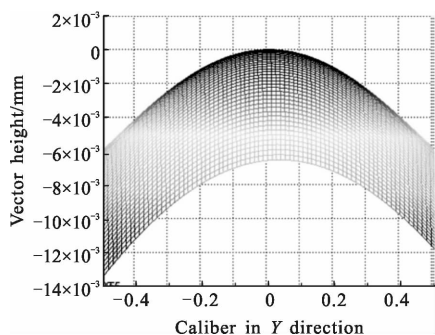
无论是在正视场还是负视场，在空间频率 17 lp/mm 处，系统传函高于 0.39，满足成像需求。由畸变/场曲图可以看出，系统畸变量在 $\pm 2\%$ 范围以内。

3.2 系统自由曲面模拟及分析

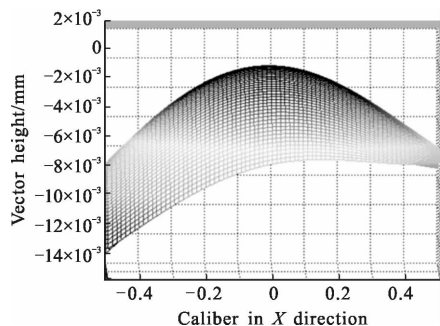
利用 MATLAB 软件模拟系统的自由曲面面型，如图 6(a)所示。图 6(b)为从 Y 方向观察自由曲面，可以看出其左右部分基本关于中间轴，即 X 轴对称；图 6(c)为从 X 方向观察自由曲面，可以看出其左右部分明显不对称，文中正是利用自由曲面 Y 方向上的不对称性，来校正光敏面倾斜引入的不对称像差。



(a) 自由曲面面型
(a) Free-form surface



(b) Y 方向视图
(b) Y direction view

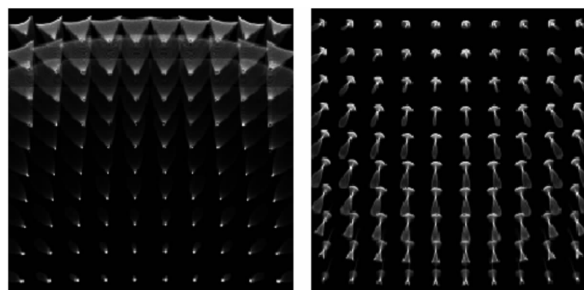


(c) X 方向视图
(c) X direction view

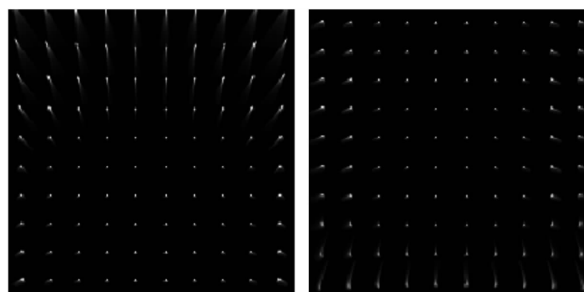
图 6 自由曲面面形图

Fig.6 Free-form surface

系统点扩散函数网格图如图 7 所示。从图中可以看出，由于光敏面倾斜，系统点扩散函数随视场增加而变大，轴上与轴外像差不一致。从图 7(b)中可以看出，加入自由曲面后，轴上与轴外点扩散函数基本一致，系统像差的不一致性得到矫正。



(a) 正视场未加自由曲面
(a) Without the free-form surface at positive field of view
(b) 负视场未加自由曲面
(b) Without free-form surface at negative field of view



(c) 正视场加入自由曲面
(c) Adding free-form surface at positive field of view
(d) 负视场加入自由曲面
(d) Adding free-form surface at negative field of view

图 7 系统点扩散函数网格图

Fig.7 Grid of point spread function

3.4 反激光主动探测性能分析

(1) 中心视场激光主动探测性能分析

由于光敏面倾斜，使得激光回波不能按原光路返回，传播一定距离后，其将偏离被探测设备的方向，从而无法被到。图 8 给出了光敏面倾斜前后，中心视场激光回波的光路图。

从图中可以看出，光敏面不倾斜时激光回波沿原光路返回，其最终能够被激光主动探测系统到。当光敏面倾斜 5° 时激光回波相对于入射光线发生偏转，依据反射定律，可计算得中心视场的偏转角度为 10° 。设计的系统角放大率为 -9.9579 ，带入上式可得激光回波出射角度约为 -1.0042° 。设激光主动探测设备口径为 100 mm，激光回波发散角为 0.1° ，已知

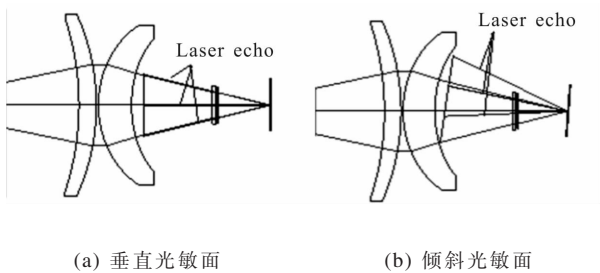
设计的系统口径为 67 mm，则系统不能被探测的距离 L 满足公式(7)：

$$L \cdot \tan(-1.0042) \geq 0.1 \text{ m} + 0.067 \text{ m} + L \cdot \tan(\Delta\theta) \quad (7)$$

从被探测系统出射时激光回波发散角的正切可由下式求得：

$$\tan(\Delta\theta) = \frac{D' - D}{2R} \quad (8)$$

式中： D 为出射时激光回波口径； D' 为传播距离 R 后激光回波口径。通过反追光迹得到，出射时激光回波半口径为 26.087 0 mm，传播距离 100 mm 后激光回波半口径为 26.911 0 mm，则可计算得激光回波发散角的正切值为 0.008 24。带入公式(7)可计算出，当激光回波传播(即激光探测设备距被测系统系统)大于 17.979 4 m 后，将无法被激光主动探测设备到。由此可见，系统的被探测距离大大减少了。



(a) Vertical photosensitive surface (b) Tilted photosensitive surface

图 8 中心视场激光回波光路图

Fig.8 Laser echo optical path at the center field

(2) 全视场反激光主动探测性能分析

对全视场内激光回波进行分析。图 9 给出了 1.68° (0.707), -1.68° (-0.707), 2.4° , -2.4° 视场对应

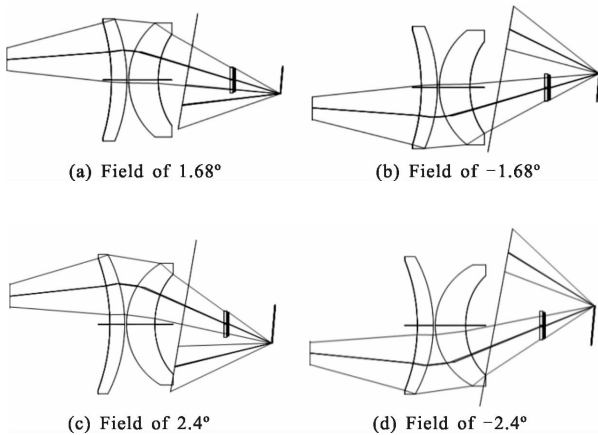


图 9 不同视场激光回波光路图

Fig.9 Laser echo optical path at different field

的激光回波光线图，从图中可以看出，这些视场下激光回波都发生了偏转，由于其与光轴夹角不为 0，则出射的激光回波也将以一定的角度偏离激光主动探测设备，从而无法被接收到。

4 系统消热差及冷反射分析

4.1 双波段系统消热差分析

由于系统涉及到两个红外波段以及光敏面倾斜设置，无热化设计较为困难。综合考虑后拟采用主动无热化方法，即通过移动探测器面来补偿热离焦^[10-11]。图 10 和图 11 给出了 -40°C 和 $+60^\circ\text{C}$ 时系统在可中波、长波红外的传递函数图。从图中可以看出，消热差后双波段传递函数有所下降，但其数值最低也为 0.3，仍满足一般红外系统成像要求。

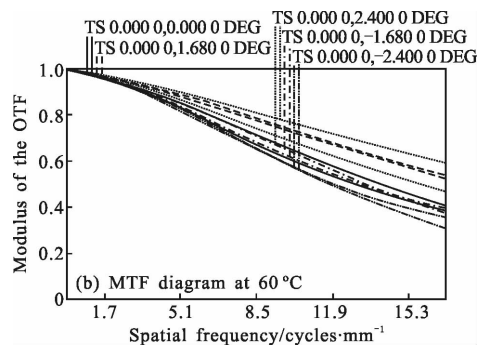
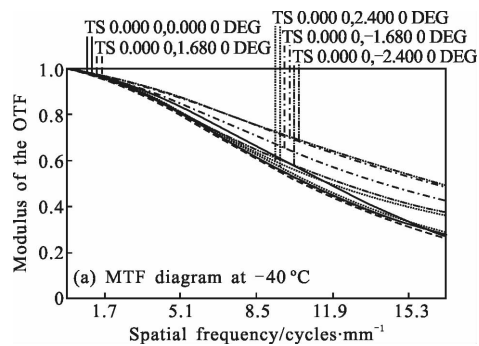
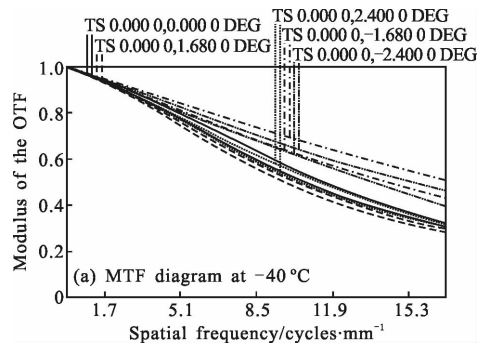


图 10 中波红外 -40°C 、 $+60^\circ\text{C}$ 传递函数图

Fig.10 -40°C 、 $+60^\circ\text{C}$ MWIR transfer function diagram



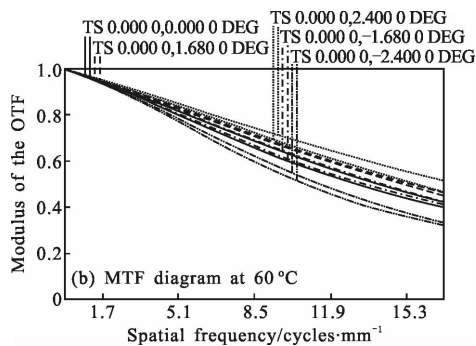


图 11 长波红外-40 °C、+60 °C传递函数图

Fig.11 -40 °C, +60 °C LWIR transfer function diagram

4.2 系统冷反射分析

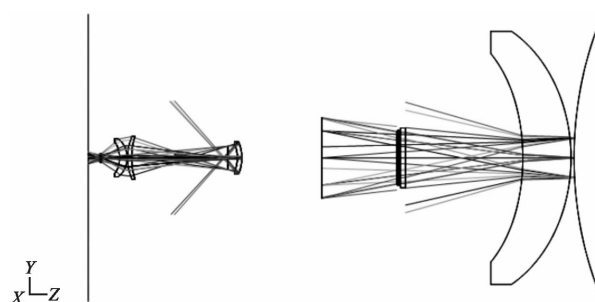
在制冷型红外光学系统中，必须考虑冷反射现象(Narcissus)。冷反射是从杜瓦瓶中发出的冷光线穿过探测器窗口，被光学系统的光学表面反射后又返回到杜瓦瓶中被探测器，进而形成冷反射现象。冷反射的存在不仅会影响光学系统的成像质量，严重时会影响到系统的识别性能。表 4 给出了中波和长波段系统的冷反射系数。

表 4 冷反射系数表

Tab.4 Cold reflection coefficient

No.	MWIR YNI	LWIR YNI
1	2.193 54	2.299 24
2	-1.025 79	-1.057 88
3	1.618 35	1.728 70
4	3.434 46	3.660 55
5	-0.136 36	-0.117 15
6	3.321 92	3.549 79
7	-1.771 84	-1.857 95
8	0.148 64	0.175 00
9	-1.746 05	-1.695 97
10	3.953 88	3.964 38

从表中可以看出第五和第八面冷反射系数 YNI 绝对值小于 1,有可能存在冷反射现象。进一步对两个面进行反向光线追迹,如图 12 所示,可以看出,对于第 5 面虽然冷反射光线汇聚,但其汇聚位置不在光敏面,故不会产生冷反射现象。对于第 8 面冷反射光线不汇聚,故不产生冷反射现象。



(a) 第 5 面全视场反向光线追迹图 (b) 第 8 面全视场反向光线追迹图
(a) 5th surface full field reverse ray tracing diagram (b) 8th surface full field reverse ray tracing diagram

图 12 反向光线追迹图

Fig.12 Reverse ray tracing diagram

5 结论

针对目前反激光主动探测技术存在降低系统能量透过率或成像质量的问题,文中结合激光主动探测的机理,提出了基于光敏面倾斜的反激光主动探测方法。设计了一款双波段红外反激光主动探测光学系统。针对光敏面倾斜引入的像差,通过在系统中加入非旋转对称的自由曲面进行了校正。所设计的系统在奈奎斯特频率 17 lp/mm 处,两个波段的传递函数均达到 0.38 以上。分析结果表明,将光敏面倾斜 5°后,理论上光学系统的被探测距离减小到 17.979 4 m,由此可见,光敏面倾斜方法能够有效地提升光电侦察设备的反激光主动探测性能。

参考文献:

[1] Li Xudong, Mi Jianjun, Ru Zhibing, et al. "Cat's eye effect" based on active laser detection [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(2): 342-347. (in Chinese)
李旭东, 米建军, 茹志兵, 等. 基于激光主动探测的“猫眼效应”研究[J]. *应用光学*, 2014, 35(2): 342-347.

[2] Zhang Yufa, Sun Xiaoquan. Laser stealth technology of photoelectric imaging equipment based on defocusing method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (8): 2268-2273. (in Chinese)
张玉发, 孙晓泉. 基于离焦方式的光电成像设备激光隐身技术[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(8): 2268-2273.

[3] Liu Bingqi, Zhou Bin, Zhang Yu. Implementation of "cat's eye" target stealth using dielectric film high mirror [J].

- Semiconductor Optoelectronics*, 2012, 33(1): 117–119. (in Chinese)
- 刘秉琦, 周斌, 张瑜. 利用介质膜高反镜实现“猫眼”目标有效隐身[J]. 半导体光电, 2012, 33(1): 117–119.
- [4] Liu Bingqi, Zhou Bin. "Cat's Eye" target stealth technology based on circular array modulation [J]. *Photoelectric Engineering*, 2012, 39(3): 1–6. (in Chinese)
- 刘秉琦, 周斌. 基于圆孔阵列调制的“猫眼”目标隐身技术[J]. 光电工程, 2012, 39(3): 1–6.
- [5] Dong Yu, Zhang Yue. Optoelectronic equipment stealth technology based on magneto-optical effect [J]. *Optical Instruments*, 2012, 34(6): 80–84. (in Chinese)
- 董宇, 张悦. 基于磁致旋光效应的光电装备隐身技术[J]. 光学仪器, 2012, 34(6): 80–84.
- [6] Mieremet Arjan L, Schleijpen Rich M A, Pouchelle P N. Modeling the detection of optical sights using retro-reflection [C]//SPIE, 2008, 6950: 6950E1–10.
- [7] Ochse D, Uhlendorf K, Reichmann L. Describing freeform surfaces with orthogonal functions [C]// International Society for Optics and Photonics, 2015, 9626: 962612–8.
- [8] Liu Chunlai, Huang Wei, Yang Wang, et al. Component rotation compensation of high imaging quality optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0911001. (in Chinese)
- 刘春来, 黄玮, 杨旺, 等. 高成像质量光学系统的元件旋转补偿 [J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0911001.
- [9] Yang Xinjun, Wang Zhaoqi, Mu Guoguang, et al. Abnormal characteristics of eccentric and oblique optical systems [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(11): 1658–1662. (in Chinese)
- 杨新军, 王肇圻, 母国光, 等. 偏心和倾斜光学系统的像差特性[J]. 光子学报, 2005, 34(11): 1658–1662.
- [10] Jiang Lun, Hu Yuan, Dong Keyan, et al. Infrared dual-band optical system passive thermal abstraction design [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3353–3357. (in Chinese)
- 江伦, 胡源, 董科研, 等. 红外双波段光学系统被动式消热差设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3353–3357.
- [11] Qu Hemeng, Zhang Xin, Wang Lingjie, et al. Design of compact, non-thermonuclear infrared optical system with large relative aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 33(3): 0322003. (in Chinese)
- 曲贺盟, 张新, 王灵杰, 等. 大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 33(3): 0322003.