

doi: 10.7690/bgzd.2019.10.003

猫眼隐身光学系统设计及回波分析

雷培奇, 高明, 陈阳

(西安工业大学光电工程学院, 西安 710021)

摘要: 为降低光学设备被激光主动探测的概率, 采用像面倾斜的方法来减弱光学系统的激光回波。基于光线传输和 2 维平面波角谱衍射理论, 分析探测激光入射到倾斜像面光学系统的衍射光场分布特性, 设计一款像面倾斜 4° 的可见光系统, 通过引入自由曲面校正像面倾斜带来的系统像差。结果表明: 系统在奈奎斯特频率 611 p/mm 处, 全视场的传递函数均高于 0.58, 成像质量好。像面倾斜 4° 的猫眼隐身光学系统, 其激光回波效率相较于像面不倾斜光学系统减弱 50% 以上, 系统被探测到的概率明显降低。

关键词: 猫眼效应; 像面倾斜; 激光主动探测; 猫眼隐身

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Design and Echo Analysis of Cat Eye Stealth Optical System

Lei Peiqi, Gao Ming, Chen Yang

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to reduce the probability of optical equipment being detected by laser active detection device, the method of oblique image plane is used to weaken the laser echo of optical system. Based on the theory of light transmission and 2-D plane wave angle spectrum diffraction, the distribution characteristics of the diffraction light field of the oblique image surface optical system are analyzed. A visible light optical system with a photosensitive inclined surface to 4 degrees is designed. The system aberration caused by oblique image is corrected by introducing free-form surface. The design results show that at Nyquist frequency 611p/mm, the optical transfer function of each field of view of the system is higher than 0.58, which is close to the diffraction limit and meets the requirements of imaging quality. The laser echo efficiency of cat's eye stealth optical system with an oblique image surface of 4 degrees is reduced by more than 50% compared with that of the non-inclined image surface optical system, and the probability of detection of the system is significantly reduced.

Keywords: cat eye effect; oblique image surface; laser active detection; cat eye stealth

0 引言

“猫眼效应”广泛存在于各类光学设备的光学窗口中, 是光学窗口被激光主动探测的主要依据。目前, 美、法、俄等军事强国都具有相对成熟的激光主动探测体系, 利用光学设备的猫眼效应, 成功研制了车载、便携、舰载和机载激光武器系统。美国空军的 PIRCM 项目以及法国 SDL-400 激光反狙击探测系统, 在近年军事活动中, 凭借其快速的探测速度以及高效的定位精度, 对敌方光学设备进行有效的致盲打击, 取得了显著的作战效果^[1]。而我国目前对猫眼效应^[2]的理论研究相对成熟, 但是对于猫眼隐身、反激光探测的研究相对滞后, 还处于理论和实验阶段。文献[3]提到给狙击步枪瞄准镜前增加圆孔阵列装置来实现隐身, 但是该方法只能用于狙击步枪, 且使狙击手的观测距离降低; 文献[4-5]提出通过增加光敏面的离焦量, 设计离焦系统, 在光敏面上镀增透膜和漫反射处理等方法实现猫眼隐

身, 然而这些方法目前都存在各种缺陷, 采用离焦、镀膜及圆孔阵列等会造成进入系统能量不足, 成像质量降低; 文献[6]基于晶体的磁致旋光效应, 对光学设备进行改装, 增加额外的晶体隐身装置, 使得设备体积增大, 而且还会降低成像质量。如何实现猫眼隐身成为现在急需解决的问题。

笔者在不增加额外装置且保证系统成像质量的前提下, 从系统内部结构出发, 采用像面倾斜的方法, 设计了像面倾斜的光学系统, 并通过引入自由曲面矫正由于像面倾斜带来的系统像差, 对像面倾斜系统的激光回波进行仿真分析。仿真结果表明: 笔者设计的像面倾斜的光学系统, 不仅可以保证系统的成像质量要求, 而且能减弱系统的激光回波, 实现猫眼隐身。

1 光波经像面倾斜猫眼系统的传输过程

1.1 倾斜像面光学系统光线传输模型

从几何光学角度出发, 可以把猫眼系统简化为

收稿日期: 2019-06-11; 修回日期: 2019-07-21

作者简介: 雷培奇(1994—), 男, 陕西人, 硕士, 从事光学设计理论及技术研究。E-mail: 1046395343@qq.com。

一个单透镜和一个平面反射镜的简化模型，对于像面倾斜的光学系统同样适用，只是像面倾斜会改变系统猫眼效应的特性，入射光线经过倾斜像面反射后的出射光线不再按原路返回。按照光线传输方向，将倾斜像面反射光束沿轴向对称展开，得到一个简化的双透镜光路传输模型如图 1 所示。 f 为系统焦距， L 为出射面到探测装置的距离， D 为透镜孔径，探测激光经过透镜 1 传输到倾斜像面， θ 为像面倾斜量(文中讨论的倾斜量皆相对于 y 轴)，经过倾斜像面反射后沿轴向展开出射到达探测器接收面，即探测激光接收装置。探测激光以 θ_i 入射到光学系统，部分光线以 θ_r 从系统出射，图 1 中 α 部分光线由于像面倾斜的原因，反射到系统的光机结构上，无法从系统出射。

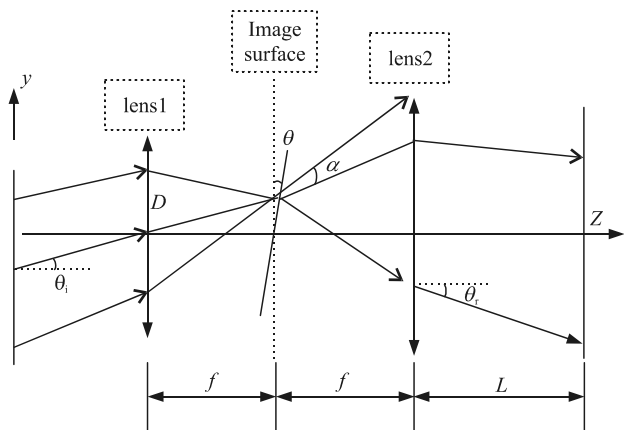


图 1 倾斜像面光学系统光线传输

理想情况下，激光探测光束经倾斜像面光线传输的简化模型传输示意图可以理解为：入射光束经透镜 1 到达倾斜像面，被倾斜像面反射到透镜 2 出射，部分光束从透镜 2 出射，其出射角为 θ_r 。入射光均匀平面波的复振幅分布为 $E_1(x,y)=1$ ，光线传输至透镜 1 的入射光束复振幅和到达透镜 2 出射面的光束复振幅^[7]可以分别表示为：

$$E_1(x,y) = \exp[-ik \sin \theta_i]; \quad (1)$$

$$E_2(x,y) = T(x,y) E_1(x,y). \quad (2)$$

其中，由于透镜 1 和 2 这 2 个透镜间的距离较近，可以将光束通过透镜 1 孔径的衍射暂时忽略，而入射光线透过透镜 1 沿光束传输方向投影至透镜 2 孔径所在平面，透镜 1 孔径的投影与透镜 2 孔径合并为一个孔径。 $T(x,y)$ 表示合并孔径光阑函数。

根据复振幅分布的角谱传播理论，把 $E_2(x,y)$ 可以看作是一系列基元函数形式为 $\exp[i2\pi(f_x x + f_y y)]$ 的线性组合，把 $E_2(x,y)$ 进行傅里叶变换，其角谱^[8]为：

$$U_2(f_x, f_y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} E_2(x,y) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy. \quad (3)$$

根据角谱衍射积分，光线从出射面出射，传输到探测器接收面上光场分布的角谱为：

$$U_3(f_x, f_y) = U_2(f_x, f_y) H_f(f_x, f_y); \quad (4)$$

$$H_f(f_x, f_y) = \exp[ikL \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}]. \quad (5)$$

式中 $H_f(f_x, f_y)$ 为标准衍射传递函数，则传输到探测器接收面上的光场分布为：

$$E_3(x,y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} U_3(f_x, f_y) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy. \quad (6)$$

其光强分布表达式为

$$I_3(x,y) = E_3(x,y) E_3^*(x,y). \quad (7)$$

其中 $E_3^*(x,y)$ 为 $E_3(x,y)$ 的共轭。

因此，可以通过对接受系统探测器接收面的光场分布，来模拟射面光强分布，用探测器接收面能接收光线数目的多少来表示其回波能量的强弱。

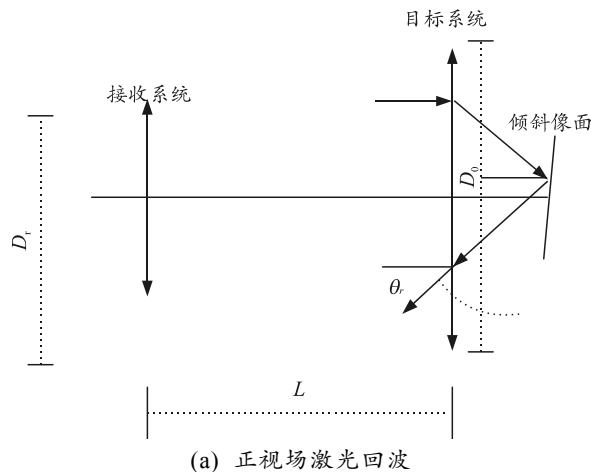
1.2 倾斜像面不同视场对激光回波的影响

结合光束实际入射的情况，对于像面倾斜的光学系统，由于主光轴与倾斜像面不垂直对称，即系统的正负视场不再对称，探测光束传输到不同视场时的激光回波发散角也不相同。从光线传输的实际情况出发，得到像面倾斜角度与回波发散角之间的关系。像面倾斜角度为 θ 时，激光回波发散角相对入射光线的关系式^[9]为：

$$\theta_r = \begin{cases} 2\theta_i + 2\theta (\theta_i \leq 0) \\ 2\theta_i - 2\theta (\theta_i > 0) \end{cases}. \quad (8)$$

式中： θ_r 为经光敏面反射后激光回波与光轴的夹角； θ_i 为入射激光与光轴的夹角。

像面倾斜对正负视场激光回波的影响如图 2 所示。



(a) 正视场激光回波

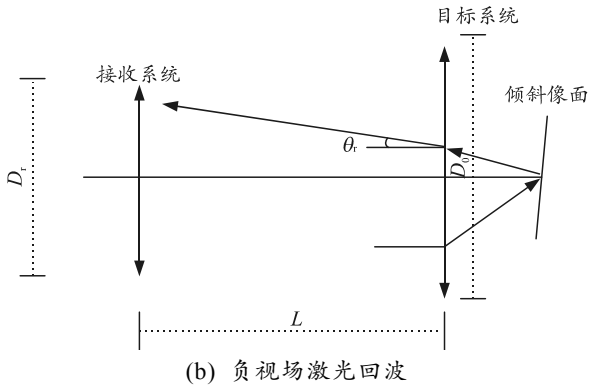


图 2 像面倾斜对视场激光回波的影响

激光回波在目标向接收系统传输的过程中，主要考虑回波发散角对激光回波的影响。从图 2 可以看出：倾斜像面系统正视场回波是发散的，回波发散角相较于像面不倾斜的光学系统增大了 2θ 。倾斜像面系统负视场回波汇聚的，回波发散角相较于像面不倾斜的光学系统减小了 2θ 。给定接收系统的入瞳直径为 D_r ， E_r 为猫眼系统产生的回波总能量， τ_r 为大气透过率，则接收系统都能够接收到的激光回波为：

$$E_{\text{正}} = \frac{E_r D_r^2 \tau_r}{16L^2 (2\theta_1 + 2\theta)^2}; \quad (9)$$

$$E_{\text{负}} = \frac{E_r D_r^2 \tau_r}{16L^2 (2\theta_1 - 2\theta)^2}。 \quad (10)$$

2 像面倾斜猫眼隐身的原理及像差校正

2.1 像面倾斜猫眼隐身的原理

基于“猫眼效应”探测像面不倾斜光电设备的原理：入射的探测激光进入系统后被像面反射，反射的激光回波将按原光路返回从系统出射，激光主动探测装置接收相应的激光回波，从而探测到该系统。笔者研究的猫眼隐身光学系统，在设计时将像面倾斜一定的角度，由于像面和主光轴不再垂直，使得入射的探测激光经倾斜像面反射后激光回波无法按原路返回。如图 3(a)所示：对于像面不倾斜光学系统，激光主动探测激光束 A、B 汇聚于像面上的 E 点，激光束 C、D 汇聚于像面上的 F 点，被像面反射产生于光路逆向的反射光束 A'、B'、C'、D'，形成按原光路返回激光回波。如图 3(b)所示：对于像面倾斜光学系统，激光主动探测激光束 A、B 汇聚于像面上的 E 点，激光束 C、D 汇聚于像面上的 F 点，但是由于像面倾斜，使反射光束 A'、B'、C' 和 D' 不能按原光路返回，B'、C' 和 D' 反射到镜筒壁上，被系统的镜筒壁吸收，无法从系统出射，只有

光束 A' 能够从系统出射，但是与入射光束 A 形成一定的夹角。因此，像面倾斜的光学系统相较于像面不倾斜的光学系统，激光回波被明显减弱，只有少部分光线能够从系统出射，系统的猫眼效应明显减弱，不足以利用猫眼效应来探测该系统，从而实现猫眼隐身的目地。

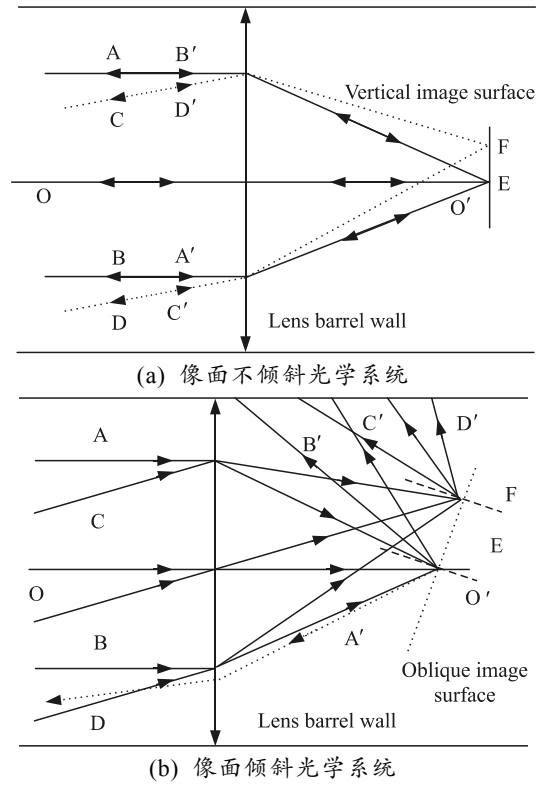


图 3 像面光学系统

2.2 倾斜像差的分析及矫正

由于像面倾斜，像面与主光轴不再垂直，破坏了系统的对称性，导致系统在 Y 方向上各视场的像差不一致，使系统在各个面产生的像差具有空间性和方向性；因此，像面倾斜系统的像差校正更为困难。运用矢量像差理论分析倾斜系统的像差特性，根据 3 阶像差多项式和像面倾斜对像差的影响，可以得到像面倾斜 θ 后，像面倾斜光学系统 3 阶波前像差塞德尔多项式的矢量表达形式^[10]：

$$W_i = W_{040i}(rr)^2 + W_{131i} [(H - \theta) \cdot r](rr) + W_{222i} [(H - \theta)r]^2 + W_{220i} [(H - \theta)(H - \theta)](rr) + W_{311i} [(H - \theta)(H - \theta)][(H - \theta)r]。 \quad (11)$$

式中： H 和 r 为系统归一化的场点高度和入瞳处孔径高度的矢量形式； θ 是像面倾斜量。

像面倾斜使得系统 Y 方向正负视场不对称，使得边缘视场像差难以矫正，造成成像质量下降。而自由曲面具有面型的不对称性，通过引入非旋转对

称的自由曲面能够很好地矫正系统正负视场像差的不对称性，提高倾斜像面光学系统的成像质量。

文中采用 XY 多项式自由曲面，其表达式^[11]为：

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=2}^N C_i x^m y^n \quad (12)$$

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， $i = [(m+n)^2 + m + 3n] / 2 + 1$ 。

式(12)由 2 部分组成：第 1 项描述的是圆锥曲面，第 2 项为 XY 多项式自由曲面面型，通过控制多项式的系数来得到想要的面型。

$$\sum_{i=2}^N C_i x^m y^n = C_2 x^1 y^0 + C_3 x^0 y^1 + C_4 x^2 y^0 + C_5 x^1 y^1 + C_6 x^0 y^2 + \dots + C_N x^m y^n \quad (13)$$

3 倾斜像面光学系统设计

3.1 设计指标

笔者设计的猫眼隐身光学系统，要求是能够减弱光学系统的猫眼效应，在所成像视场内无强激光回波出射，满足一般成像光学系统的成像质量要求。为了对比倾斜像面和不倾斜像面的回波效率，分别设计了像面倾斜和像面不倾斜光学系统。选取的探测器参数如表 1 所示。

表 1 探测器参数

波段/ μm	探测器	像面尺寸	相对孔径	像元大小/ μm
0.40~0.76	ccd	1/2 inch	1/6	8.6×8.3

表 3 自由曲面系数

X1Y0	X0Y1	X2Y0	X1Y1	X0Y2	X3Y0	X2Y1	X1Y2	X0Y3	X4Y0
3.01E-007	2.34E-005	-7.7E-003	6.27E-009	-7.86E-003	0-1.85E-006	-0.052	3.96E-008	-0.017	1.15E-003
X3Y1	X2Y2	X1Y3	X0Y4	X5Y0	X4Y1	X3Y2	X2Y3	X1Y4	X1Y5
-2.61E-008	-3.37E-003	-1.65E-009	-2.59E-004	2.916E-005	-0.02	-6.025E-008	-6.078E-003	1.950E-008	3.076E-004

在不考虑内部因素对分辨率影响的前提下，对于可见光波段，CCD 的奈奎斯特频率 N_n 为：

$$N_n = \frac{1}{2\phi} = \frac{1}{2 \times 8.3 \times 10^{-3}} = 60.241 \text{ p/mm}$$

其中 ϕ 为探测器的像元大小，取 611 p/mm 作为评价可见光波段系统光学传递函数的最大参考空间的频率值。

3.2 光学系统的设计结果及像质评价

3.2.1 系统设计

设计的“猫眼”隐身光学系统波段为 0.4~0.76 μm ，系统焦距为 122 mm，视场为 $\pm 3^\circ$ ，系统总长为 137 mm，由 5 片单透镜组成，系统结构参数如表 2 所示，像面倾斜角度为 4° 。为了提高系统成像质量，校正由于像面倾斜引入的像差，在第 5 片透镜上引入自由曲面，自由曲面系数如表 3 所示，系统结构如图 4(a)所示。对比设计了可见像面不倾斜的光学系统，由于没有倾斜像面，所以采用 4 片普通单透镜组成，系统结构如图 4(b)所示。

表 2 系统结构参数

曲率半径/mm	厚度/mm	玻璃
53.460	7.840	H-LAF6LA
-110.660	2.920	
-72.410	2.650	ZF10
73.450	34.000	
549.500	5.540	H-LAK7A
-39.260	3.920	
-33.500	3.000	H-LAF6LA
-102.330	62.371	
INFINITY	5.000	PMMA
INFINITY	10.00	
INFINITY	—	

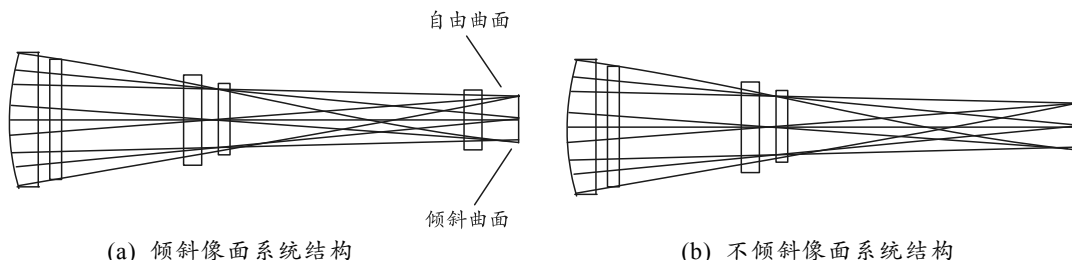
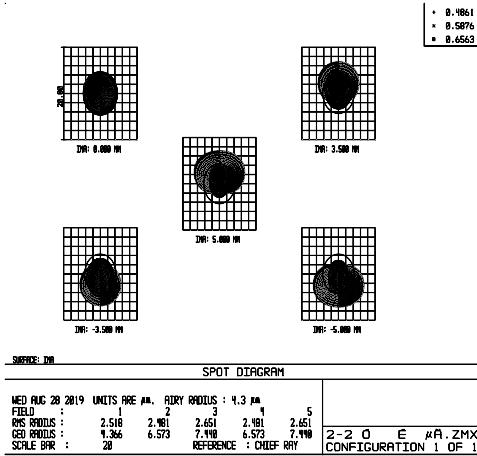


图 4 像面系统结构

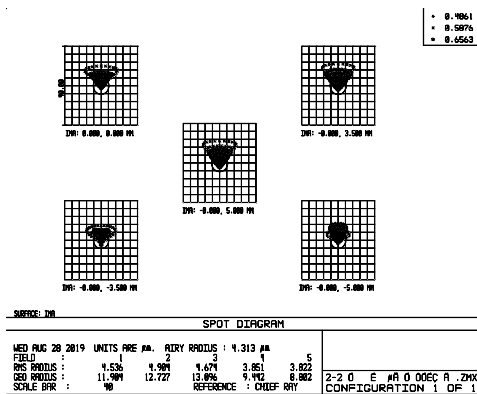
3.2.2 像质评价

由像差理论可知，光学系统的像质受到几何像差和衍射的影响。图 5(a)、(b)分别为可见像面不倾斜和倾斜的点列图。可以看出：像面倾斜系统对于

像差的影响要大于像面不倾斜的光学系统，倾斜和不倾斜 2 个光学系统的点列图的艾里斑直径均大于几何像差引起的弥散斑直径，能够满足一般成像质量的要求。



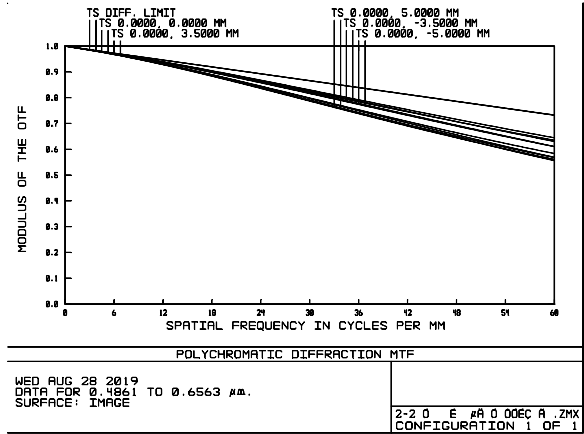
(a) 像面不倾斜点列图



(b) 像面倾斜点列图

图 5 像面列图

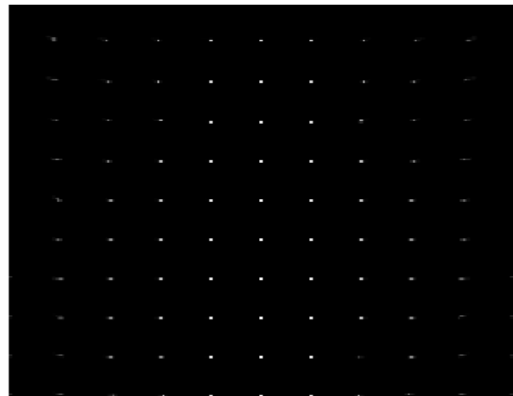
可见像面不倾斜和倾斜光学系统的光学调制传递函数(modulation transfer function)如图 6 所示。从光学传递函数中可以看出：像面不倾斜光学系统的 MTF 要优于像面倾斜的光学系统，但是在奈奎斯特空间频率为 611 p/mm 时，像面倾斜系统各视场的 MTF 值均大于 0.58，接近衍射极限，满足成像质量的要求。



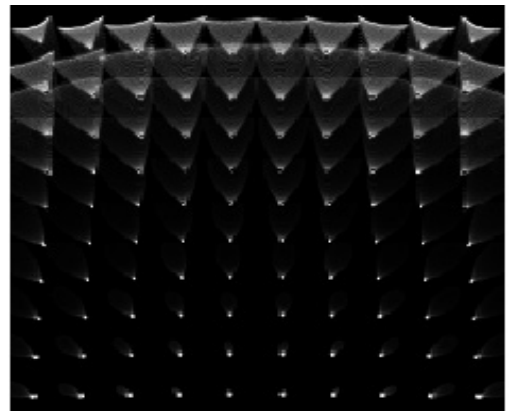
(b) 像面倾斜系统 MTF

图 6 像面系统 MTF

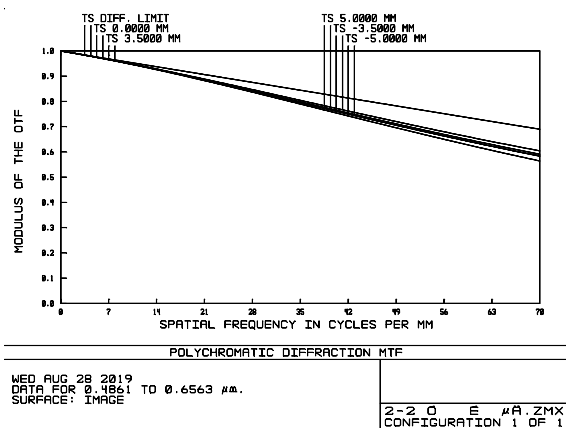
系统点扩散函数如图 7 所示。图 7(a)为像面不倾斜的光学系统，轴上与轴外像差差异性很小；图 7(b)为像面倾斜未加自由曲面光学系统，可以明显看到轴上与轴外像差存在很大的差异性；图 7(c)为像面倾斜光学系统引入 xy 多项式自由曲面之后的点扩散函数图，轴上像差与轴外像差的不一致性能够得到明显改变。



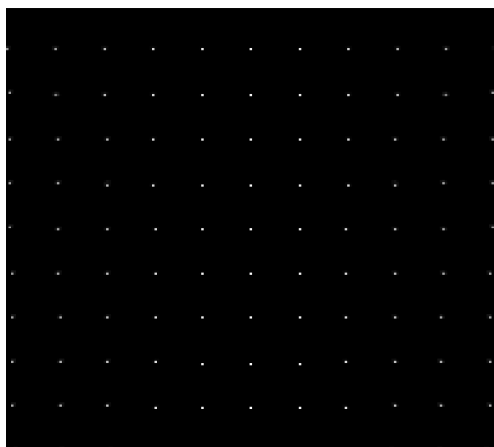
(a) 像面不倾斜光学系统



(b) 像面倾斜光学系统



(a) 像面不倾斜系统 MTF



(c) 引入自由曲面

图 7 系统点扩散函数

4 倾斜系统的猫眼回波特性分析

4.1 像面倾斜与不倾斜的全视场光线追迹

对比分析了像面倾斜和不倾斜光学系统的回波特性，将所设计光学系统进行逆光线追迹。从图 8 可以看出：倾斜像面相较于不倾斜像面光学系统的激光回波有明显向上偏折现象，会使得部分激光回波反射到系统的光机结构，被系统涂有涂层的光机结构吸收，只有少部分激光回波能够从系统出射，这部分激光回波有较大的回波发散角，从系统出射后偏离激光探测接收装置，从减弱系统的激光回波能量方面来实现猫眼隐身。

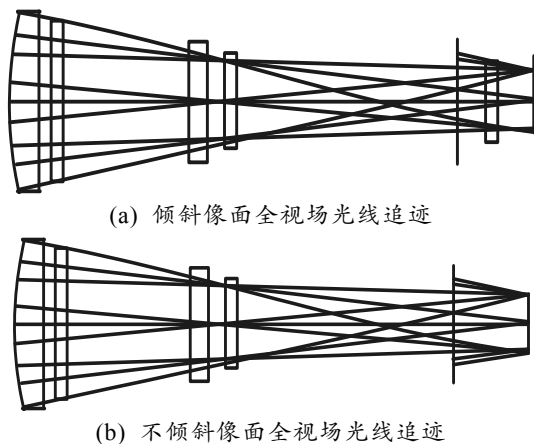


图 8 像面全视场光线追迹

4.2 倾斜角度对激光回波的影响

由于激光光束截面内光线的密集程度与光线的能量成正比，定义激光回波效率 η 为：从光学系统探测器表面反射出来被探测器接收的光线数目 N_r 与探测激光进入光学系统的光线数目总数 N_i 的比值^[12]，在大气透过率 τ_1 ，透镜透过率 τ_2 ，探测器表

面反射率 σ 等参数一定的情况下，运用光线追迹的方法，对笔者设计的像面倾斜光学系统进行光线追迹，分析像面倾斜对激光回波能量的影响。如式(14)所示，用 η 表示激光探测装置探测猫眼系统的回波效率， I_i 为入射激光的总能量， I_r 为激光回波能量，回波效率直接影响激光回波能量。

$$\eta = \frac{N_r}{N_i}; \quad (14)$$

$$I_r = I_i \tau_1^2 \tau_2^2 \sigma \eta. \quad (15)$$

首先分析不同像面倾斜角度对激光回波的影响。以零视场主光线为例，分别分析了不同倾斜角度对于激光回波的影响，从图 9 可以明显看出：系统回波效率在像面不倾斜时回波能量达到最大，接近于 1，随着倾斜角度的增大，系统回波效率逐渐减小，直到在倾斜 4° 时，回波效率降低到 0，说明此时系统无激光回波出射。

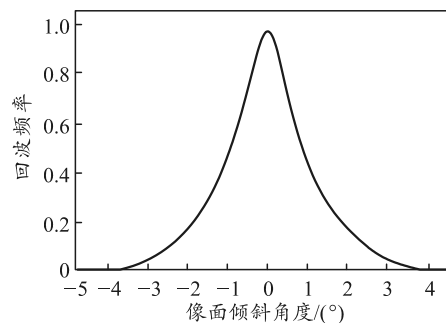


图 9 不同倾斜角度的激光回波效率

从图中可以看出：当像面倾斜到 4° 时，系统回波效率为 0，说明零视场主光线进入被探测猫眼系统后已无法从系统出射，但是当设置全视场光线进入像面倾斜 4° 的光学系统时，进行光线追迹，仍然有部分光线从系统出射，影响着系统的激光回波；因此，分析不同视场光线对系统激光回波的影响十分必要。

4.3 不同视场对激光回波的影响

对全视场内激光回波进行分析，图 10 给出了 -3° 、 $-2.1^\circ(-0.707)$ 、 $2.1^\circ(0.707)$ 、 3° 视场对应的激光回波光线。正视场的光线进入猫眼系统后，回波发散角相较于像面不倾斜时增大了 2θ ，向上偏折十分明显，正视场的反射光线基本都反射到涂有吸收率 90% 以上的涂层镜筒壁，回波能量经过吸收后再多次反射，无法从系统出射，回波能量几乎为零。负视场光线进入系统后，回波发散角相较于不倾斜时减小了 2θ ，回波发散角的减小，提高了系统直视

场的激光回波效率；因此，倾斜像面的猫眼效应的激光回波能量主要由负视场反射回来的回波提供。负视场的回波能量直接影响系统的回波效率。

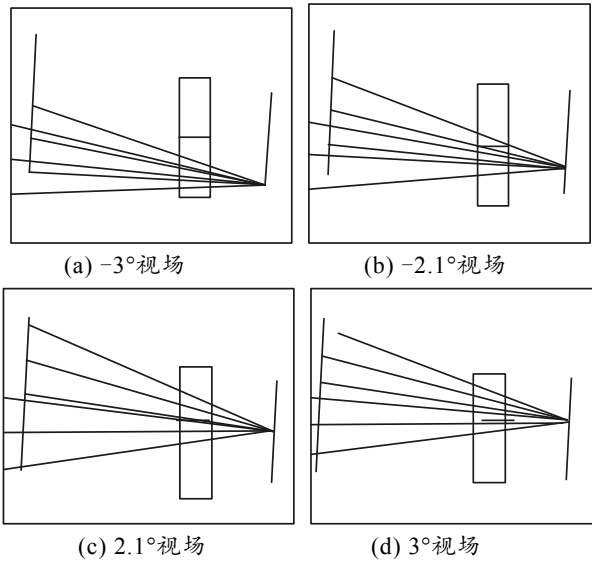
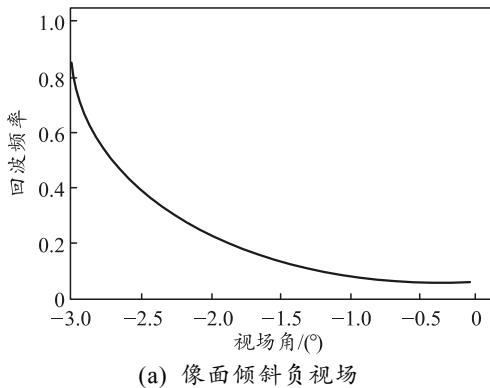


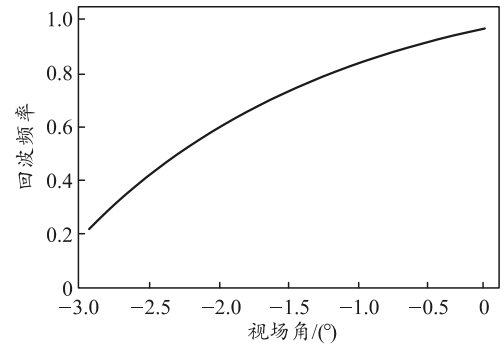
图 10 不同视场激光回波

4.4 像面倾斜与不倾斜的回波效率

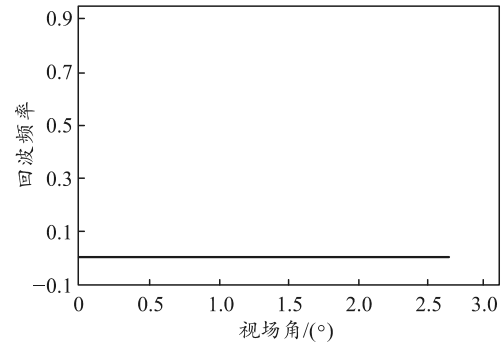
如图 11 所示，笔者通过光线追迹的方法，分析了像面倾斜 4°和像面不倾斜时正负视场的回波效率，模拟了回波效率随视场角的变化曲线。从图中可以明显看出：像面不倾斜时，正负视场回波效率几乎相同，集中分布在-2.1°~2.1°视场之间，且其回波效率都高于 50%以上，对于像面倾斜光学系统，其回波效率主要由负视场贡献，且回波效率从-3°视场到 0°视场急剧下降，回波效率衰减到 10%以下，而正视场回波效率为零。总体而言，像面倾斜光学系统相较于像面不倾斜光学系统，激光回波效率至少降低了 50%。而系统的激光回波效率与系统被探测概率成正比，可以明显看出：激光主动探测装置同时探测像面倾斜和不倾斜系统时，像面倾斜系统的被探测概率降低明显。



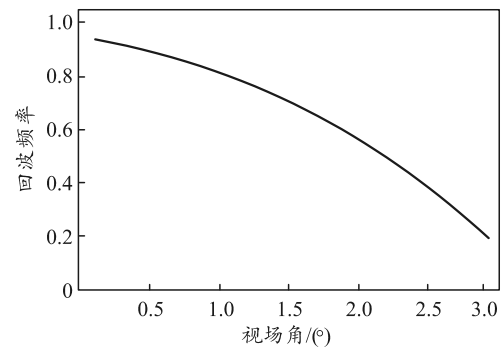
(a) 像面倾斜负视场



(b) 像面不倾斜负视场



(c) 像面倾斜正视场



(d) 像面不倾斜正视场

图 11 回波效率

5 结论

笔者从减弱光学设备的猫眼效应出发，设计了像面倾斜的猫眼隐身光学系统，成像质量满足要求。通过建立倾斜像面猫眼光束传输模型，推导并仿真了探测激光光束经过倾斜像面光学系统的衍射光场分布特性，分析了像面倾斜角度与激光回波的关系，计算了像面倾斜 4°时，不同视场的激光回波效率。结果表明：像面倾斜角度越大，回波效率迅速衰减，当像面倾斜 4°时零视场与正视场光线无法从系统出射，像面倾斜 4°的光学系统回波能量主要由系统的负视场反射的回波提供。回波效率相对于不倾斜光学系统减弱 50%以上，理论上像面倾斜 4°时光学系统被探测概率明显降低，为对抗激光主动探测提供了一种新方法。

参考文献:

- [1] 蔡雨轩, 欧阳名钊, 付跃刚. 影响激光主动探测效能的机理研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(4): 2-5.
- [2] 赵延仲, 孙华燕, 宋丰华. 猫眼效应用于激光主动探测技术的研究现状与发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(10): 2-3.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 张悦, 华文深, 周斌, 等. 分划板失调时猫眼系统的反射特性[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(8): 3-6.
- [8] 赵延仲, 孙华燕, 樊鹏山, 等. 大角度斜入射情况下的猫眼效应激光反射特性[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(7): 1-3.
- [9] 陈阳, 张安锋, 茹志兵. 反激光探测红外双波段光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2017(9): 3-6.
- [10] 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.
- [11] 刘军. 自由曲面在成像光学系统中的研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016: 20-26.
- [12] 李会, 陈青山, 李晓英, 等. 猫眼效应中离焦量对激光回波发散角的影响[J]. 应用光学, 2016, 37(1): 3-5.
- *****
- (上接第 6 页)
- 4 结束语
- 笔者重点研究了基于概念格和角色筛选如何建立角色层次结构, 以及角色层次结构与产品生成的控制关系。在实现过程中, 获取任务需求关系和依模块融合处理态势信息是另外 2 个重要问题, 需要结合任务背景实施。任务需求关系的获取可以通过综合研讨或采集态势系统使用记录。文中方法可以在一定任务集合的关系中生成对其他任务使用有意义的角色, 因此, 任务需求关系的获取不必十分全面。如果能建立模块主题、态势要素与信息处理方式的对应规则, 将进一步提高态势产品生成的效率和系统性水平。这也是下一步重要的研究内容。
- 参考文献:
- [1] 李永红, 郭星华, 单国慧. 主动式态势图服务关键技术研究[J]. 测绘科学, 2006(2): 63-65, 5.
- [2] 赵宗贵, 李君灵, 王珂. 战场态势估计概念、结构与效能[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(3): 226-230.
- [3] 陈建林, 巴宏欣, 朱孟平, 等. 联合作战共用战场态势图的构建[J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(2): 21-24.
- [4] 林树. 战场数据链分级态势处理仿真评估系统的设计与实现[J]. 通信技术, 2017, 50(8): 1757-1762.
- [5] 田威, 黄高明. 面向任务的战场态势生成控制与优化[J]. 指挥与控制学报, 2017, 3(2): 144-148.
- [6] 李婷婷, 金欣, 闫晶晶. 面向作战任务需求的态势计算服务组织方法[J]. 指挥信息系统与技术, 2016, 7(5): 25-29.
- [7] 马晓普, 李瑞轩, 胡劲纬. 访问控制中的角色工程[J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34(6): 1301-1306.
- [8] 花青松. 个性化推荐系统用户兴趣建模研究与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- [9] SHELLING J. A push technology personal librarian project[J]. Australian Academic & Research Libraries, 2012, 43(2): 135-145.
- [10] 丁继红. 个性化教育资源主动服务模式研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2016.
- [11] 韩道军, 侯彦娥, 贾培艳. 基于概念格模型的角色提取[J]. 计算机科学, 2012, 39(12): 162-166.
- [12] 耿文东. 空间态势感知导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 65-80.
- [13] 王玮. 基于概念格的关联规则挖掘及变化模式研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.