

“猫眼效应”的物理模型及证明

卿光弼 王学楷 郭勇 陈德章 张承铨

(西南技术物理研究所, 成都, 610041)

摘要: 本文阐述了光学系统中存在的“猫眼效应”物理模型, 利用傅氏变换性质证明了“猫眼效应”。当激光光束以任一角度入射至“猫眼”光学系统时, 将沿入射光方向返回。对普通目标和“猫眼”目标的光学反回率作了比较。

关键词: “猫眼效应” 傅里叶变换

Physical model of “cat eye effect” and its certification

Qing Guangbi, Wang Xuekai, Guo Yong

Chen Dezhang, Zhang Chengquan

(Southwest Institute of Technical Physics)

Abstract: In an optical system, “cat eye effect” can be modeled as a focus lens system. Based on the model and Fourier transform, “cat eye effect” is proved while a laser beam is projected on a “cat eye effect” system at an arbitrary incident angle, it will return along incident direction. Finally, the comparison of reflectance of “cat eye effect” objects and ordinary objects is made.

Key words: “cat eye effect” Fourier transform

一、引言

对远距离处的光学系统如何精确定位定向是一个非常重要的课题, 尤其是现代战场大量光电武器装备的使用(如激光测距机, 红外热象仪, 激光雷达, 激光、红外、电视制导武器等)给敌我双方都构成了极大威胁。为了对抗这些光电武器装备, 一个主要的手段就是引导强激光去软杀伤或硬破坏上述光电武器装备的传感器。而引导的第一步是要精确确定光电装备中光学系统的方位。传统的方法满足不了导引所需的高精度要求, 而利用光学系统本身的“猫眼效应”去精确确定光学系统的方法最为理想。

二、“猫眼效应”的物理模型及证明

当一束很窄的相干激光束照射到远处光学系统时, 就会产生很强的光返回现象。若对其回波进行测试, 则发现其光学反回率要比普通目标高出若干倍。人们把这一现象称之为“猫眼效应”。“猫眼效应”的实质是: 在大多数光电装备的光学系统中, 在其焦平面上安装有反射

元件(如瞄准叉丝,光电传感器光敏面,阴极射线管的光电阴极板等),即形成“猫眼效应”的物理模型可简化为如图 1 所示的光学系统。

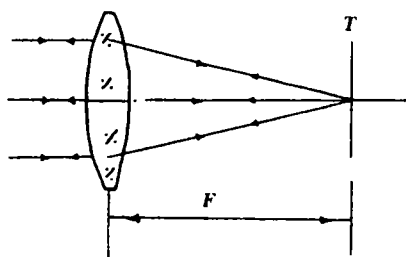


Fig. 1 Optical model of "cat eye effect" system

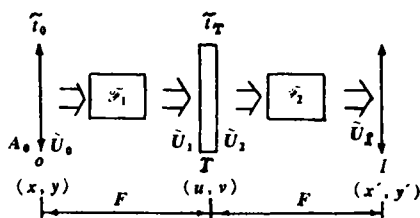


Fig. 2 "Cat eye effect" is equivalent to a coherent imaging system

聚焦透镜是系统的入瞳, T 即为聚焦透镜的焦平面(叉丝,光敏面等所处位置),从傅里叶变换的观点来看^[1],图 1 可看作是图 2 所示的相干成象滤波系统。其中 O 为物平面, T 为变换平面(滤波器), I 为象平面, $(x, y), (u, v), (x', y')$ 为三个平面的空间坐标,其中 $\tilde{t}_0(x, y)$ 和 $\tilde{t}_T(u, v)$ 分别是物平面和变换平面的光振幅透过率。在正入射的相干光照明条件下,物平面上的振幅分布为:

$$\tilde{U}_0(x, y) = A_0 \tilde{t}_0(x, y) \quad (1)$$

若设变换平面 T 上振幅透过率 $\tilde{t}_T = \rho$ ($0 < \rho < 1$, 这实际上就是光敏面上的光学反射率),

则
$$\tilde{U}_T(x, y) = \rho \tilde{U}_1(u, v) = \tilde{U}_T(u, v) \quad (2)$$

在象平面 I 上复振幅分布 $\tilde{U}_I(x', y')$ 可认为是经历两次夫琅和费衍射,复振幅的变换都是傅里叶变换,故有

$$\begin{aligned} \tilde{U}_I(x, y) &= \mathcal{F}_2 \{ \tilde{U}_T(u, v) \} \\ \tilde{U}_T(u, v) &= \mathcal{F}_1 \{ \tilde{U}_0(x, y) \} \end{aligned} \quad (3)$$

由(1),(2)和(3)式并根据傅里叶变换定义可得:

$$\tilde{U}_T(u, v) = \iint_{-\infty}^{+\infty} A_0 \rho \tilde{t}_0(x, y) \exp \left[\frac{-ik}{F} (xu + yv) \right] dx dy \quad (4)$$

$$\tilde{U}_I(x', y') = \iint_{-\infty}^{+\infty} \tilde{U}_T(u, v) \exp \left[\frac{-ik}{F} (ux' + vy') \right] du dv \quad (5)$$

将(4)式代入(5)式,得:

$$\begin{aligned} \tilde{U}_I(x', y') &= \iiint_{-\infty}^{+\infty} A_0 \rho \tilde{t}_0(x, y) \exp \left\{ \frac{-ik}{F} [u(x+x') + v(y+y')] \right\} du dv dx dy \\ &= \iint_{-\infty}^{+\infty} A_0 \rho \tilde{t}_0(x, y) \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[\frac{-ik(x+x')}{F} u \right] du \right\} \\ &\quad \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[\frac{-ik(y+y')}{F} v \right] dv \right\} dx dy \\ &= \rho A_0 \iint_{-\infty}^{+\infty} \tilde{t}_0(x, y) \delta(x+x') \delta(y+y') dx dy \\ &= \rho A_0 \tilde{t}_0(-x', -y') = \rho \tilde{u}_0(-x, -y) \end{aligned} \quad (6)$$

(6)式说明输出图象与输入图象完全一样, x, y 前的负号只表示象是倒立的, 即光沿原光路返回! 只是振幅有所降低($0 < \rho < 1$)。

对于斜入射的相干平行光, 设入射光与系统光轴的夹角为 θ , 如图 3 所示。

同理可得:

$$\widetilde{U}_1(x, y) = A_0 \widetilde{U}_0(x, y) = A_0 \widetilde{t}_0(x, y) \exp[ik(\sin\theta_{10}x + \sin\theta_{20}y)] \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \widetilde{U}_T(u, v) &= \mathcal{F}_1\{\widetilde{U}_1(x, y)\} \\ \widetilde{U}_I(x', y') &= \mathcal{F}_2\{\widetilde{U}_T(u, v)\} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将(7)式代入(8)式, 得:

$$\begin{aligned} \widetilde{U}_T(u, v) &= \iint_{-\infty}^{+\infty} A_0 \rho \widetilde{t}_0(x, y) \exp[ik(\sin\theta_{10}x + \sin\theta_{20}y)] \exp\left[\frac{-ik}{F}(xu + yv)\right] dx dy \\ &= \iint_{-\infty}^{+\infty} \rho A_0 \widetilde{t}_0(x, y) \exp\left\{\frac{-ik}{F}[x(u - F\sin\theta_{10}) + y(v - F\sin\theta_{20})]\right\} dx dy \\ \widetilde{U}_I(x', y') &= \iint_{-\infty}^{+\infty} \widetilde{U}_T(u, v) \exp\left[\frac{-ik}{F}(ux' + vy')\right] du dv \\ &= \iiint_{-\infty}^{+\infty} \rho A_0 \widetilde{t}_0(x, y) \exp\left\{\frac{-ik}{F}[x(u - F\sin\theta_{10}) + y(v - F\sin\theta_{20})]\right\} \exp\left[\frac{-ik}{F}(ux' + vy')\right] du dv dx dy \\ &= \iint_{-\infty}^{+\infty} \rho A_0 \widetilde{t}_0(x, y) \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[\frac{-ik}{F}(x + x')u\right] du \right\} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[\frac{ik}{F}(y + y')v\right] dv \right\} \\ &\quad \exp\left[\frac{-ik}{F}(xF\sin\theta_{10} + yF\sin\theta_{20})\right] dx dy \\ &= \rho A_0 \iint_{-\infty}^{+\infty} \widetilde{t}_0(x, y) \exp\left[\frac{-ik}{F}(xF\sin\theta_{10} + yF\sin\theta_{20})\right] \delta(x + x') \delta(y + y') dx dy \\ &= \rho A_0 \widetilde{t}_0(-x, -y) \exp\left[\frac{-ik}{F}(xF\sin\theta_{10} + yF\sin\theta_{20})\right] \\ &= \rho \widetilde{U}_1(-x, -y) \end{aligned} \quad (9)$$

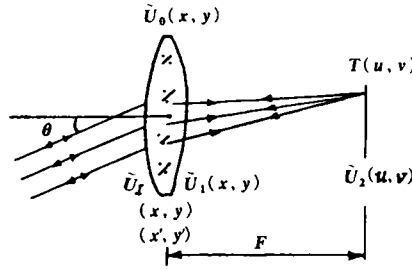


Fig. 3 Project on to a "cat eye effect" system at an angle

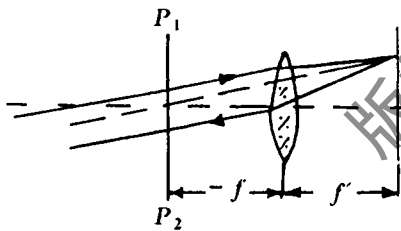


Fig. 4 A "cat eye effect" optical system illuminated by noncoherent light

式中, F 为聚焦透镜焦距, $\sin\theta_{10}, \sin\theta_{20}$ 为倾斜因子。(9)式 同样说明输出图象与输入图象完全一样, 同样沿原照明光路返回, 只是振幅有所降低而已($0 < \rho < 1$)。由此得出结论: 当一束相干光以任意入射角照明“猫眼”光学系统时, 反射光都将严格沿原照明光路返回。

广义地讲, 普通“猫眼”反射器被非相干平行光照明也同样具有这样的性质, 因为任何类型的“猫眼”反射器均可简化成图 4 所示的模型。即“猫眼”反射器是透镜和反射面的组合, 只需简单的变换即可证明。设 P_1, P_2 为光线的入射面和出射面; $r(o), \theta(o)$ 为入射面光线离轴

高度和入射角; $r(z)$, $\theta(z)$ 为出射光线离轴高度和出射角, 则有关系^[2]:

$$\begin{pmatrix} r(z) \\ \theta(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r(o) \\ \theta(o) \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中, $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ 为光线传递矩阵, 代入(10)式则有: $\begin{pmatrix} r(z) \\ \theta(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r(o) \\ \theta(o) \end{pmatrix}$

$$\text{即} \quad \begin{cases} r(z) = -r(o) \\ \theta(z) = -\theta(o) \end{cases} \quad (11)$$

同样说明反射光严格沿原照明光路返回。

当然, “猫眼”效应具有对照明光相位和偏振的变换特征, 严格来讲可以通过傅氏变换解析这些变换特征。但是, “猫眼”物体和大气组合的位相变换函数是一个极其复杂的函数。

三、“猫眼”目标与普通目标反回率比较

1. 普通目标 当一束相干光照明距离光源为 R_1 处的普通目标时, 该目标可看作余弦辐射体, 设相干光束散角为 θ , 则该目标可看作被照面光源, 该面光源向 2π 立体角空间散射相干光, 则该面积辐射的光通量为:

$$dF = k_1 A dS \quad (12)$$

式中, k_1 为散射系数, A 为相干光在面积 dS 上产生的照度。若在距离为 R_2 处放一接收器感知该目标的辐射亮度, 则有

$$B = dF/d\Omega \quad (13)$$

式中, $d\Omega$ 为探测器面向该目标所张单位立体角, B 为探测器感知的目标辐射亮度, 经分析计算有:

$$\left. \begin{aligned} d\Omega &= 2R_2^2/r_2^2 \\ B &= k_1 A r_2^2 \pi (R_1 \theta)^2 / (2R_2^2) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中, r_2 为探测器孔径半径。目标反回率定义为:

$$\overline{R}_1 = B/A = [k_1 r_2^2 \pi (R_1 \theta)^2] / (2R_2^2) \quad (15)$$

2. “猫眼”目标 对于“猫眼”目标, 同理可得:

$$dF = k_2 A dS \quad (16)$$

式中, k_2 为探测器光敏面反射系数。经分析计算可得:

$$\left. \begin{aligned} d\Omega &= (2R_2 \theta)^2 / r_2^2 \\ B &= dF/d\Omega = [k_2 A r_2^2 \pi (R_1 \theta)^2] / (2R_2 \theta)^2 \\ \overline{R}_2 &= B/A = [k_2 r_2^2 \pi (R_1 \theta)^2] / (2R_2 \theta)^2 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

将 \overline{R}_2 与 \overline{R}_1 作一比较, 有

$$\overline{R}_2 / \overline{R}_1 = [1/(2\theta^2)] (k_2/k_1) \quad (18)$$

从(16)式不难看出, 因 $\theta \ll 1$, $k_2 \gg k_1$, 必有 $\overline{R}_2 \gg \overline{R}_1$, 即“猫眼”目标的光学反回率远大于普通目标光学反回率。

四、结 束 语

“猫眼效应”是一较新的物理现象。本文仅作了初步的、一般性的分析和证明, 进一步的工作还应该对“猫眼效应”所引起的相干光偏振和相位特性变化作一些深入的研究。

版权所有 © 《激光技术》编辑部