

相干合成线阵高斯光束扫描识别猫眼目标理论分析

赵延仲 孙华燕 郑勇辉 章喜

(装备指挥技术学院, 北京 101416)

摘要 提出了一种利用相干合成线阵高斯光束扫描识别漫反射背景中的猫眼目标的新方法。建立了线阵高斯光束的相干合成数学模型,利用 Collins 衍射积分公式以及将硬边光阑窗口函数分解为有限个复高斯函数之和的方法,推导了相干合成线阵高斯光束通过猫眼目标和朗伯漫反射体反射后的解析光强分布公式。通过数值计算分析了目标尺寸、光束线阵数对反射光时间分布特性的影响。结果表明,朗伯漫反射体的反射光时间分布不具有周期特征,其尺寸越大,时间分布展宽越大;猫眼目标的反射光时间分布周期特征与目标处的光强纵向分布周期特征相似,其口径越大,丢失的频率特征越多。基于该方法可以有效地从复杂漫反射背景中快速识别出猫眼目标,并估计出漫反射体或猫眼目标的尺寸大小。

关键词 物理光学;相干合成线阵高斯光束;扫描识别;猫眼目标;朗伯漫反射体

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0412002

Theoretical Analysis of Scanning and Identifying Cat-Eye Target with Coherently Combined Array Gaussian Beams

Zhao Yanzhong Sun Huayan Zheng Yonghui Zhang Xi

(Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China)

Abstract A new identification method of cat-eye target from diffusion reflective background by scanning the coherently combined array Gaussian beams is proposed. The mathematical model of coherent combination of array Gaussian beams is established. By using Collins diffraction integral formula and method of expanding the aperture function into a finite sum of complex Gaussian functions, approximate analytical formulas for coherently combined array Gaussian beams passing through a cat-eye target and a Lambert diffusion reflective target are derived, respectively. Through numerical calculation, effects of array number and target size on the characteristics of the time distribution of the reflected light are studied. It is found that there is no periodic characteristics in the time distribution of the Lambert diffusion reflective light, and the time distribution width increases along with the increase of the target size. The periodic characteristics of the time distribution of the cat-eye reflected light are similar to those of the y -axis distribution at the position of the target, and the lost frequency characteristics increase along with the increase of the aperture size of the cat-eye target. So the cat-eye target can be identified from complicated diffusion reflective background easily and quickly, and the size of the diffusion reflective target or the cat-eye target can be estimated.

Key words physical optics; coherently combined array Gaussian beams; scanning and identifying; cat-eye target; Lambert diffusion reflective target

OCIS codes 120.1880; 030.1640; 050.1960; 290.1990

1 引言

大多数成像探测或非成像探测所用光学镜头的焦平面处都安装有反射或半反射元件,它们对入射

激光具有很强的原路返回特性和准直特性,使得其原路返回光强度与漫反射光相比要高出很多,此即光学目标的“猫眼效应”^[1~9]。基于该原理可以有效

收稿日期: 2010-11-18; **收到修改稿日期**: 2010-12-04

基金项目: 国防预研基金(TY7131008)和“十一五”国防预研基金(513210902)资助课题。

作者简介: 赵延仲(1984—),男,博士研究生,主要从事激光主动探测、光电信息处理等方面的研究。

E-mail: zhaoyan198@tom.com

导师简介: 孙华燕(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事激光主动探测、光电信息处理等方面的研究。

E-mail: shy221528@vip.sina.com

地从漫反射背景中探测出光学目标,并大大提高探测距离和定位精度。应用猫眼效应的激光武器系统在战场上作用显著,但是该系统只能完成初步的发现任务,不能进行智能识别^[2]。在现代化城市作战中,短距离强反射背景下的光学目标反射信号很容易淹没在背景信号之中,仅仅依靠反射光的强度探测无法有效判断威慑光学目标的存在。因此,为了进一步得到更多的定量信息以提高激光探测系统的可靠性和智能性,研究者对猫眼目标的反射光特性进行了大量研究^[3~9]。但是这些研究主要是描述猫眼目标反射光的空间分布特征^[5~9]。虽然这些特征中含有大量与背景漫反射光不同的信息,但是空间分布特征却不易被测量,因为接收系统后端的传感器只能处于固定位置。

为了将目标反射光特性演化为可测量的时间序列,达到从强漫反射背景中有效识别出光学目标的目的,本文提出了一种利用相干合成阵列高斯光束扫描识别漫反射背景中的猫眼目标的新方法。将猫眼目标视为一个理想的双透镜组合,将漫反射背景视为一个理想的圆形朗伯体,利用 Collins 衍射积分

公式以及将硬边光阑窗口函数分解为有限个复高斯函数之和的方法,得到了相干合成线阵高斯光束扫描目标时原路返回处的时间光强分布公式。通过数值计算分析了目标大小、光束线阵数对两种目标反射光时间分布特性的不同影响规律。

2 相干合成线阵高斯光束扫描识别猫眼目标原理

相干合成线阵高斯光束扫描识别猫眼目标的原理如图 1 所示。通过光束转换系统改变线阵高斯光束的间距,控制目标处的光强分布特征,并使该相干合成线阵光束以一定的速度扫描通过目标。此时,进入猫眼目标光学窗口的输入光信号成为与干涉条纹间距有关的一个时间周期信号,而漫反射目标所接受的光信号总和在概率统计上将失去周期性,于是两种目标的反射光信号在周期上将会具有不同特征。进而通过回波的频谱分析,就可以方便地判断出猫眼目标是否存在。

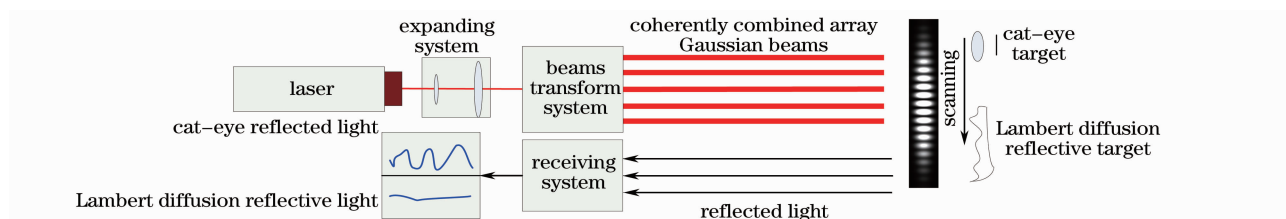


图 1 相干合成线阵高斯光束扫描识别猫眼目标原理

Fig. 1 Principle of scanning and identifying cat-eye target with coherently combined array Gaussian beams

3 相干合成线阵高斯光束扫描通过不同目标的传输过程

假设在直角坐标系下, $z = 0$ 平面处有 $2N + 1$ 束束腰宽度均为 ω_0 的高斯光束沿直线排列,相邻子光束在 x 方向的间距为 d_x ,在 y 方向的间距为 d_y 。这 $2N + 1$ 束子光束构成了一个线阵。为了便于使该线阵合成光束的中心位于原点,并与单高斯光束相比较,将光束数目取为了奇数。则这 $2N + 1$ 束高斯光束在 $z = 0$ 平面处的光场分布为

$$E_0(x_0, y_0, z_0) = \sum_{n=-N}^N \exp\left[-\frac{(x_0 - nd_x)^2 + (y_0 - nd_y)^2}{\omega_0^2}\right]. \quad (1)$$

下面分别分析该线阵高斯光束扫描通过 $z = L$ 处的理想猫眼目标和理想圆形朗伯反射体的传输过程。

3.1 猫眼目标

将该线阵高斯光束通过猫眼目标的光路传输过程展开,可以得到一个双透镜组合,如图 2 所示。由于猫眼目标为圆对称系统,图中只画出了 yOz 平面。假设发射光束沿 x 正方向的扫描角速度为 v_x ,沿 y 正方向的扫描角速度为 v_y ,猫眼目标初始位置坐标为 (o_x, o_y) 。则扫描时刻为 t 时猫眼目标的位置坐标 $(O_x, O_y) = (o_x - v_x Lt, o_y - v_y Lt)$ 。图中,透镜 1 和 2 分别可以等效为两个等效光阑,其半口径为 R ,焦距为 f , z' 为猫眼目标的主光轴。

为了推导方便,将输入线阵高斯光束在 $x'y'z'$ 坐标系下的表达式写为

$$E'_0(x'_0, y'_0, z'_0) = \sum_{n=-N}^N \exp\left[-\frac{(x'_0 - nd_x - O_x)^2 + (y'_0 - nd_y - O_y)^2}{\omega_0^2}\right]. \quad (2)$$

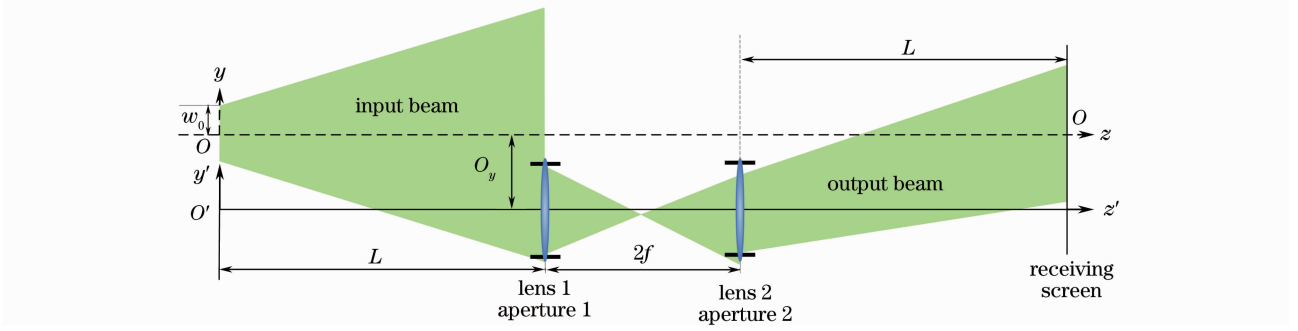


图 2 相干合成线阵高斯光束扫描通过猫眼目标的传输过程

Fig. 2 Propagation of scanning and passing a cat-eye target with coherently combined array Gaussian beams

根据 Collins 积分公式^[10~12],可以得到该线阵高斯光束在自由空间传播距离 L 后到达透镜 1 前的光场分布为

$$E'_1(x'_1, y'_1, z'_1) = \frac{ik}{2\pi L} \exp\left[-\frac{ik(x_1^2 + y_1^2)}{2L}\right] \iint E'_0(x'_0, y'_0, z'_0) \exp\left\{-\frac{ik}{2L}[(x_0^2 + y_0^2) - 2(x'_0 x'_1 + y'_0 y'_1)]\right\} \times dx'_0 dy'_0 = \frac{ik}{2P_1^2 L} \sum_{n=-N}^N \exp\left\{-\frac{1}{w_0^2}[(nd_x + O_x)^2 + (nd_y + O_y)^2]\right\} \exp\left[-\frac{ik}{2L}(x_1^2 + y_1^2)\right] \times \exp\left\{-\frac{k^2}{4L^2 P_1^2} \left\{ \left[x'_1 - \frac{2iL(nd_x + O_x)}{k w_0^2} \right]^2 + \left[y'_1 - \frac{2iL(nd_y + O_y)}{k w_0^2} \right]^2 \right\} \right\}, \quad (3)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长, 且

$$P_1^2 = \frac{1}{w_0^2} + \frac{ik}{2L}. \quad (4)$$

等效光阑 1 和 2 的窗口函数可以写为

$$T(x, y) = \begin{cases} 1 & x^2 + y^2 \leq R^2 \\ 0 & \text{others} \end{cases}, \quad (5)$$

将其展开为复高斯函数之和^[13~16]

$$A(x, y) = \sum_{j=1}^J F_j \exp\left[-\frac{G_j}{R^2}(x^2 + y^2)\right], \quad (6)$$

式中 F_j 和 G_j 分别为展开系数和复高斯函数系数, 可由计算机优化得到。

再次利用 Collins 公式, 经过推导可以得到该线阵高斯光束通过光阑 1 和猫眼目标光学系统后到达光阑 2 前的光场分布为

$$E'_2(x'_2, y'_2, z'_2) = \frac{ik}{4\pi f} \exp\left[\frac{ik(x_2^2 + y_2^2)}{4f}\right] \iint E'_1(x'_1, y'_1, z'_1) A(x'_1, y'_1) \exp\left\{\frac{ik}{4f}[(x_1^2 + y_1^2) + 2(x'_1 x'_2 + y'_1 y'_2)]\right\} \times dx'_1 dy'_1 = \frac{-k^2}{8P_1^2 f L} \exp\left[\frac{ik}{4f}(x_2^2 + y_2^2)\right] \sum_{n=-N}^N \sum_{j=1}^J \frac{F_j}{P_2^2} \exp\left\{-\frac{1}{w_0^2} \left(1 - \frac{1}{P_1^2 w_0^2}\right) [(nd_x + O_x)^2 + (nd_y + O_y)^2]\right\} \times \exp\left\{-\frac{k^2}{16f^2 P_2^2} \left\{ \left[x'_2 + \frac{2f(nd_x + O_x)}{L w_0^2 P_1^2} \right]^2 + \left[y'_2 + \frac{2f(nd_y + O_y)}{L w_0^2 P_1^2} \right]^2 \right\} \right\}, \quad (7)$$

式中

$$P_2^2 = \frac{ik}{2L} - \frac{ik}{4f} + \frac{k^2}{16f^2 P_1^2} + \frac{G_j}{R^2}. \quad (8)$$

同理, 可以推导得到该线阵高斯光束在自由空间传输距离 L 后, 到达原路返回处接收屏上的光场分布为

$$E'_3(x'_3, y'_3, z'_3) = \frac{-ik^3}{16P_1^2 L^2 f} \exp\left[-\frac{ik}{2L}(x_3^2 + y_3^2)\right] \times \sum_{n=-N}^N \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S \frac{F_j F_s}{P_2^2 P_3^2} \exp\left\{\left(\frac{1}{P_1^2 w_0^4} - \frac{1}{w_0^2} - \frac{k^2}{4L^2 P_2^2 w_0^4 P_1^4}\right) [(nd_x + O_x)^2 + (nd_y + O_y)^2]\right\} \times \exp\left\{-\frac{k^2}{4L^2 P_3^2} \left\{ \left[x'_3 + \frac{ik(nd_x + O_x)}{4f w_0^2 P_1^2 P_2^2} \right]^2 + \left[y'_3 + \frac{ik(nd_y + O_y)}{4f w_0^2 P_1^2 P_2^2} \right]^2 \right\} \right\}, \quad (9)$$

式中

$$P_3^2 = \frac{ik}{2L} - \frac{ik}{4f} + \frac{k^2}{4b_2^2 P_2^2} + \frac{G_3}{R^2}. \quad (10)$$

当 $N=0$ 时, (9) 式简化为单高斯光束通过猫眼目标并达到原路返回处的光场分布公式。

在 xyz 坐标系下, 原路返回处的光场分布可以写为

$$E_3(x_3, y_3, z_3) = E'_3(x_3 + O_x, x_3 + O_x, z_3), \quad (11)$$

则原路返回点 O 处的光场可以表示为

$$E_O = E_3(0, 0, z_3), \quad (12)$$

其光强为

$$I_O = E_O E_O^*, \quad (13)$$

式中 E_O^* 为 E_O 的共轭函数。(13) 式表示的光强值

即为猫眼目标离轴位置亦即扫描时刻 t 的函数。

3.2 朗伯漫反射目标

假设漫反射目标为一理想的朗伯漫反射体, 其反射率为常数 ρ 。根据朗伯余弦定律^[17], 漫反射在空间均匀分布, 反射光与入射光的入射角的余弦成正比。由于反射体的尺寸相对于传输距离来说很小, 该余弦值可以简化为常数 1, 则原路返回点 O 处的漫反射光强值为

$$I_d = \iint_{\sigma} \rho I_{1d}(x_1, y_1, z_1) dx_1 dy_1 = \iint_{\sigma} \rho E_{1d}(x_1, y_1, z_1) E_{1d}^*(x_1, y_1, z_1) dx_1 dy_1, \quad (14)$$

式中 σ 为该漫反射体的积分区域, 且

$$E_{1d}(x_1, y_1, z_1) = \frac{ik}{2P_1^2 L} \sum_{n=-N}^N \exp\left[-\frac{n^2}{\omega_0^2}(d_x^2 + d_y^2)\right] \times \exp\left[-\frac{ik}{2L}(x_1^2 + y_1^2)\right] \exp\left\{-\frac{k^2}{4L^2 P_1^2} \left[\left(x_1 - \frac{2iLnd_x}{k\omega_0^2}\right)^2 + \left(y_1 - \frac{2iLnd_y}{k\omega_0^2}\right)^2\right]\right\}. \quad (15)$$

为了求得解析分布以进行定量分析, 将不规则的朗伯漫反射体等效为同面积的一个圆形朗伯体, 其等效半径为 R_d , 则在 t 时刻该朗伯反射体的反射窗口函数为

$$A_d(x, y) = \sum_{j=1}^J F_j \exp\left\{-\frac{G_j}{R_d^2} [(x + O_x)^2 + (y + O_y)^2]\right\}. \quad (16)$$

经过推导(14)式可以转化为

$$I_d = \iint_{\sigma} \rho A_d(x_1, y_1) E_{1d}(x_1, y_1, z_1) E_{1d}^*(x_1, y_1, z_1) dx_1 dy_1 = \frac{\rho \pi k^2}{4P_1^2 P_1^{*2} L^2} \sum_{u=-N}^N \sum_{v=-N}^N \sum_{j=1}^J \frac{F_j}{P_d^2} \exp\left[-\frac{G_j(O_x^2 + O_y^2)}{R_d^2}\right] \exp\left[-\left(\frac{u^2 + v^2}{\omega_0^2} + \frac{u^2}{\omega_0^4 P_1^2} + \frac{v^2}{\omega_0^4 P_1^{*2}}\right)(d_x^2 + d_y^2)\right] \times \exp\left\{-\frac{k^2}{4LP_d^2} \left[\left(\frac{ud_x}{\omega_0^2 P_1^2} - \frac{vd_x}{\omega_0^2 P_1^{*2}} + \frac{2ib_1 G_j O_x}{kR_d^2}\right)^2 + \left(\frac{ud_y}{\omega_0^2 P_1^2} - \frac{vd_y}{\omega_0^2 P_1^{*2}} + \frac{2ib_1 G_j O_y}{kR_d^2}\right)^2\right]\right\}, \quad (17)$$

式中 P_1^* 为 P_1 的共轭函数, 且

$$P_d^2 = \frac{G_j}{R_d^2} + \frac{k^2}{4L^2 P_1^2} + \frac{k^2}{4L^2 P_1^{*2}}. \quad (18)$$

4 数值分析与讨论

数值计算时取初始值 $\omega_0 = 1 \text{ mm}$, $\lambda = 1.06 \text{ } \mu\text{m}$, $L = 500 \text{ m}$, $f = 0.5 \text{ m}$, $\rho = 0.1$ 。由于猫眼目标系统一般为中心对称系统, 为了计算方便取 $d_x = 0$, $d_y = 8 \text{ mm}$, $v_x = 0$, $v_y = 0.1 \text{ rad/s}$, 目标初始位置坐标为 $o_x = 0$, $o_y = R + 0.25 \text{ m}$, 则 $O_x = 0$, $O_y = o_y - v_y Lt$ 。设 $z = 0$ 平面处的轴上光强值为 1, 其他光强均为相对值, 无量纲单位。

数值分析表明, 当线阵数 N 一定时, 目标处的干涉条纹间距主要由 d_y 决定, d_y 越大, 干涉条纹越

密, 因此对 d_y 的影响不再作画图分析。图 3 给出了不同线阵数时目标处的 y 向光强分布曲线。可以看出, 当 N 值越大, 目标处的干涉光强分布曲线包含的空间频率点越多, 且各频率点的幅值大小不一。因此, 可以通过增加光束线阵数来对发射光束加载更多频率信息。

取 $N = 2$, 图 4 给出了不同 R 时猫眼目标反射光在原路返回点 O 处的时间分布曲线。可以看出, 当 R 取较小值 5 mm 时, 其时间分布曲线轮廓形状及峰值分布点与图 3(c) 所示的目标处的 y 向光强分布曲线非常接近, 这说明当 R 较小时, 通过扫描的方法可以将目标处的空间光强分布曲线调制为原路返回处的时间光强分布曲线, 且包含的频率点分布及幅值基本不变。随着 R 的增大, 原路返回处的时间光强

分布特征开始变化,主峰宽度逐渐变窄,但是周期不变。这是因为当 R 较大时,一个口径尺寸内可以包含目标处干涉光强分布的多个频率点信息,这些多频率点信息在通过猫眼目标并反射回原路返回处的传输过程中被平均化。因此, R 越大,目标处的空间分布在被转化为原路返回处的扫描时间分布的过程中丢失的频率信息越多,从而可以通过对反射光时间分布曲线的频谱分析得出信息量丢失的多少,进一步估算出 R 的大小。但是当 R 大于20 mm后并继续

增大时,其主峰之间的小峰值变化已经不大,这说明时间分布丢失的信息量达到恒定,此时将不能估计出 R 的大小。更多的数值分析表明, N 越大, d_y 越大,一定 R 口径包含的信息量越大,可以估算的最大口径范围也就越大,因此可以通过调节 N 和 d_y 来估计 R 的大小。此外, $N=0$ 时,猫眼目标反射光的时间分布轮廓同于图3(a)所示,不具有周期特征, R 的大小对时间光强分布轮廓亦没有影响。

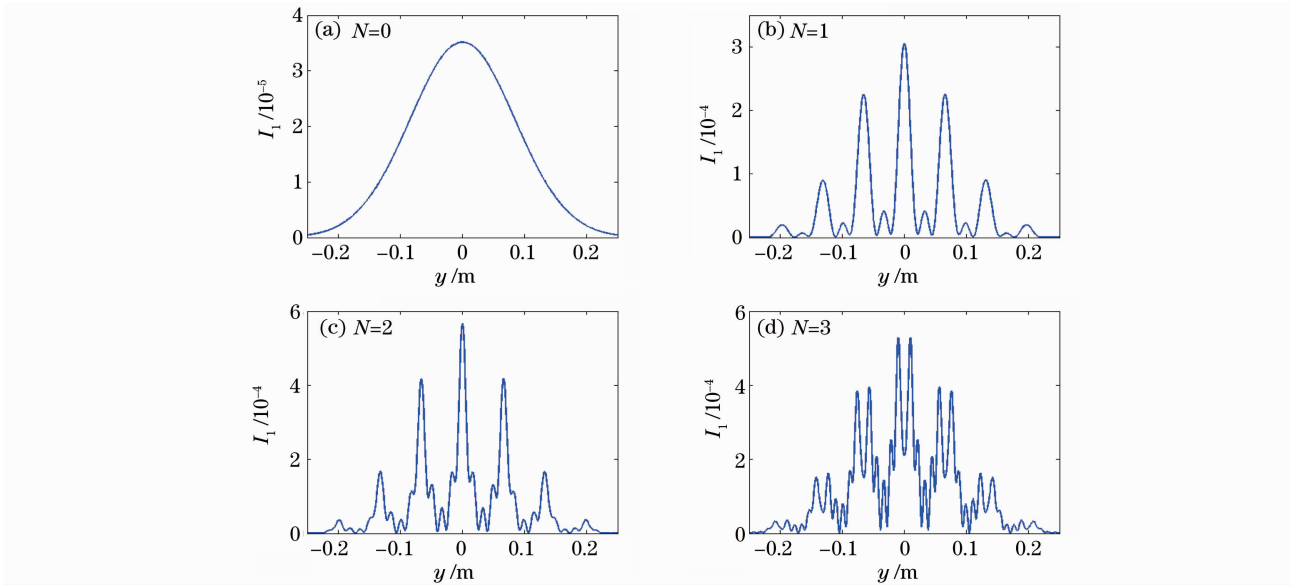


图3 目标处的 y 向光强分布曲线

Fig. 3 y -axis distributions of the light intensity at the position of the target

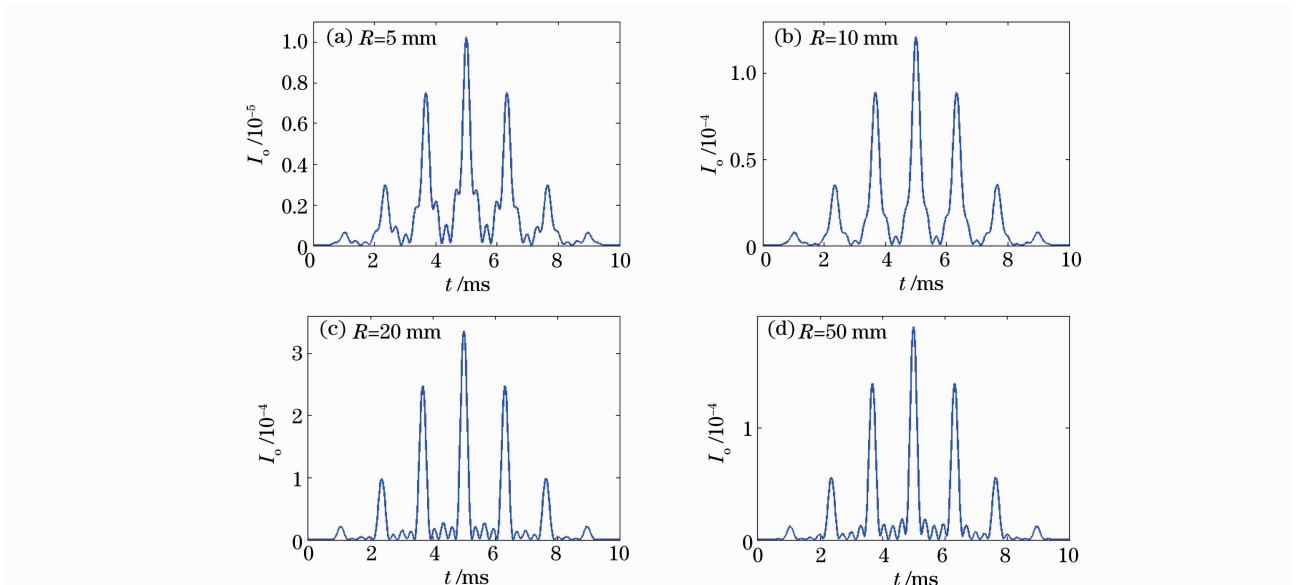


图4 原路返回点 O 处的猫眼目标反射光时间分布曲线

Fig. 4 Time distribution of the cat-eye reflected light at the return point O

设 $o_y = R_d + 0.25$ m,图5给出了不同 R_d 时原路返回处的漫反射光时间分布曲线。可以看出,当

朗伯反射体等效尺寸 R_d 较小时,其反射光时间分布曲线是简单的类高斯轮廓,不再具有任何周期特

性。这是由于朗伯反射体的空间均匀反射特性,不论朗伯反射体的等效尺寸多小,目标处的干涉光强分布的频率特征都在这个统计平均过程中丢失,于是原路返回处的光强分布形成了完全不相干叠加。随着 R_d 的增大,时间光强分布逐渐展宽,且分布轮廓逐渐变为平顶高斯模式,上升下降沿逐渐变得陡峭。同时可以看出,时间光强分布覆盖的范围即为

朗伯反射体的横向等效宽度 $2R_d$ 与目标处的干涉光强分布宽度之和。数值分析表明, N 值对朗伯反射体反射光的时间分布曲线基本没有影响。因此,通过单光束扫描的方法就可以很容易的估计出目标尺寸的大小,但是无法从区分出目标是猫眼目标还是漫反射体。

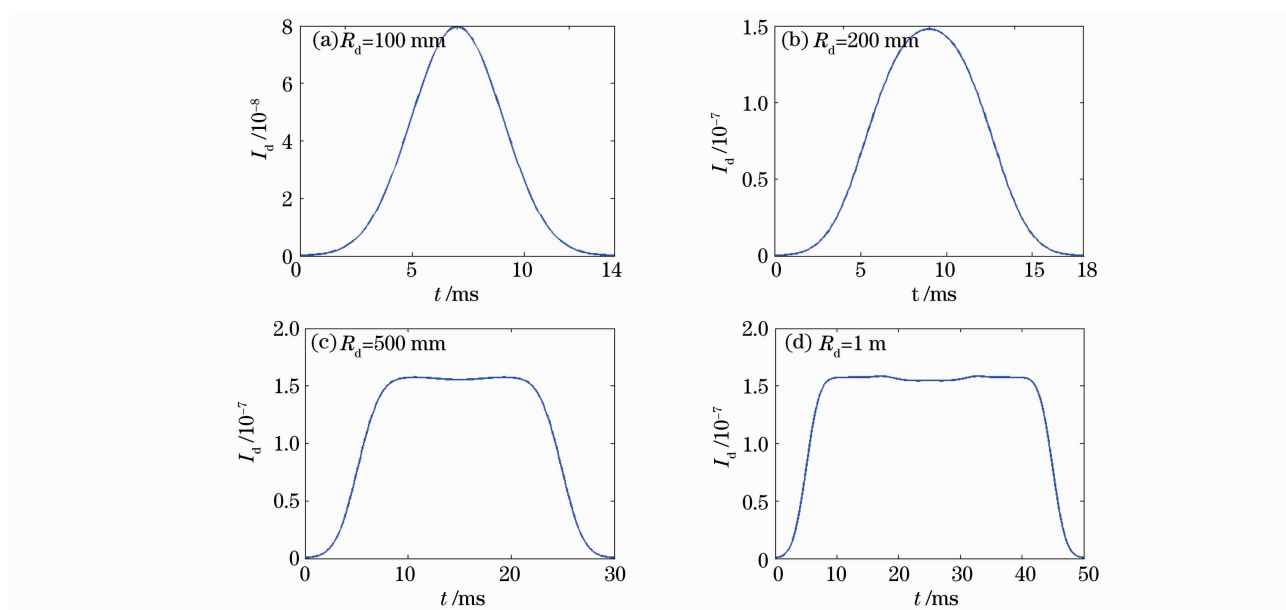


图 5 原路返回点 O 处的朗伯漫反射体反射光时间分布曲线

Fig. 5 Time distribution of the reflected light of the Lambert diffusion reflective target at the return point O

5 结 论

提出了一种利用相干合成线阵高斯光束扫描识别漫反射背景中的猫眼目标的新方法。推导了相干合成线阵高斯光束被猫眼目标和朗伯漫反射体反射后的解析光强分布公式。结果表明,朗伯漫反射体的反射光时间分布不具有周期特征,其尺寸越大,反射光时间分布展宽越大;猫眼目标的反射光时间分布周期特征与目标处干涉光强的纵向分布周期特征相似,口径越大,丢失的频率特征越多。因此该方法可以方便地区分出朗伯漫反射体和猫眼目标的反射信号,并进一步估计出漫反射目标或猫眼目标的尺寸大小。但本文主要是进行理论方法阐述,建立的模型比较理想,且只考虑自由空间传输。实际应用中的激光束大都是部分相干的,且大气湍流对辐照在目标上的光强分布有平滑作用和周期调制作用。在这些情况下,如何有效区分漫反射体和猫眼目标的反射信号,仍需要进一步的理论与实验研究。

参 考 文 献

1 C. Lecocq, G. Deshors, O. Lado-Bordowsky *et al.*. Sight laser

detection modeling[C]. *SPIE*, 2003, **5086**: 280~286

2 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua *et al.*. Research and prospect of cat-eye effect used for active laser detection technique[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(10): 102802

赵延伸, 孙华燕, 宋丰华 等. 猫眼效应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): 102802

3 Qin Kai, Han Shaokun, Liu Jianhu. Evaluation and analysis to the "cat's eye" effect in typical optical observation window[J]. *Optical Technique*, 2010, **36**(3): 391~394

秦楷, 韩绍坤, 刘建虎. 典型光学观瞄窗口的“猫眼”效应特性评价与分析[J]. *光学技术*, 2010, **36**(3): 391~394

4 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Zhao Linfeng *et al.*. Studies on interference characteristics of cat-eye reflected light of defocused optical lens [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2537~2542

赵延伸, 孙华燕, 赵琳峰 等. 离焦光学镜头的猫眼效应反射光干涉特性研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2537~2542

5 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Fan Pengshan *et al.*. Laser reflection characteristics of cat-eye effect under large angle oblique incidence[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(7): 1457~1461

赵延伸, 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): 1457~1461

6 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua *et al.*. Propagation properties of oblique and off-axial Gaussian beams passing through cat-eye optical lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2552~2556

- 赵延伸, 孙华燕, 宋丰华等. 倾斜离轴高斯光束通过猫眼光学镜头的传输特性[J]. 光学学报, 2009, **29**(9): 2552~2556
- 7 Zhao Yanzhong, Song Fenghua, Sun Huayan *et al.*. Laser reflection characteristics of cat eye effect of Cassegrain lens[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1149~1155
- 赵延伸, 宋丰华, 孙华燕等. 卡塞格伦镜头的猫眼效应激光反射特性[J]. 中国激光, 2008, **35**(8): 1149~1155
- 8 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Zhao Yanzhong *et al.*. Three-dimensional analytical formula for oblique and off-axis Gaussian beams propagating through a cat-eye optical lens[J]. *Chin. Phy. Lett.*, 2010, **27**(3): 034101
- 9 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua *et al.*. Research on the mechanism of reflection characteristics of laser irradiation on the cat eye optical lens[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(4): 2284~2294
- 赵延伸, 孙华燕, 宋丰华等. 激光辐照猫眼光学镜头时的反射特性机理研究[J]. 物理学报, 2008, **57**(4): 2284~2294
- 10 Chen Senhui, Zhang Tingrong, Feng Xiaofang. Transformation properties of Hermite-Laguerre-Gaussian beam in fractional Fourier transform plane[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 374~378
- 陈森会, 张廷蓉, 冯小芳. 分数傅里叶变换面上厄米-拉盖尔-高斯光束的变换特性[J]. 中国激光, 2009, **36**(2): 374~378
- 11 Ling Ming, Dong Yuan, Cheng Liang *et al.*. Propagation properties of hollow cone double Gaussian beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2920~2923
- 凌 铭, 董 渊, 陈 良等. 空心锥状双高斯光束传输特性研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(10): 2920~2923
- 12 Chen Jiannong, Yu Yongjiang, Wang Feifei. The propagation of generalized hypergeometric beams in ABCD optical systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 902~906
- 陈建农, 于永江, 王菲菲. 广义超几何光束在 ABCD 光学系统中的传播[J]. 光学学报, 2009, **29**(4): 902~906
- 13 Feng Youjun, Zhang Rongzhu, Zhang Bin. Propagation properties of the beam generated by Gaussian mirror resonator passing through a paraxial ABCD optical system[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2010, **2**(4): 662~668
- 14 Li Jinghui, Zhang Hujie, Zhou Shenlei *et al.*. Effect of smoothing by spectral dispersion considering the hole used in spacial filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 827~832
- 李菁辉, 张琥杰, 周申蕾等. 空间滤波器小孔对谱色散匀滑使用效果的影响[J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 827~832
- 15 Zou Qihui, Zhu Hongyu, Duan Xi. Propagation properties of ultrashort pulsed Bessel-Gaussian beams diffracted by an circular aperture[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 235~239
- 邹其徽, 朱红宇, 段 茜. 受圆孔衍射的超短脉冲贝塞耳-高斯光束的传输特性[J]. 中国激光, 2009, **36**(s1): 235~239
- 16 Chen Senhui, Zhang Tingrong, Feng Xiaofang. Propagation properties of cosh-squared-Gaussian beam through fractional Fourier transform systems[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(6): 1083~1087
- 17 J. David Zook. A simple model for diffuse reflection[J]. *Opt. Commun.*, 1976, **17**(1): 77~82