

文章编号 1004-924X(2018)04-0807-09

基于 M-Z 干涉光路的光学目标探测

单聪淼*, 孙华燕, 赵延伸, 陈剑彪, 任建迎
(装备学院, 北京 101416)

摘要: 为了进一步提高激光主动探测系统对光学目标的探测识别能力, 提出了一种利用扫描干涉场将目标的空间分布特征加载到反射光时间序列信号中, 通过反射光时间分布的特征差异在复杂漫反射背景中探测光学目标的新方法。基于马赫-曾德尔干涉光发生体制, 得到了远场干涉图样条纹间距与传输距离、M-Z 干涉光发生装置参数和激光波长的关系式。分析了条纹间距对不同目标原路返回点处光强时间分布特性的影响。搭建了演示验证平台, 结果显示, 随着干涉场的条纹间距减小, 光学目标的反射光时间分布峰峰数增多, 峰峰比降低, 而漫反射目标没有明显变化。漫反射目标和光学目标的反射光时间分布的方差、偏度和峰度等统计特征差异明显, 其中峰度值分别为(4.37, 62.8)、(4.03, 34.97)和(3.91, 35.4), 整体相差一个数量级。利用反射光时间分布的包络形态和统计特征的较大差异可快速区分光学目标与漫反射背景。

关键词: 激光主动探测; 相干探测; 马赫-曾德尔干涉; 光学目标; 漫反射

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182604.0807

Optical target recognition based on optical path of Mach-Zehnder interferometric

SHAN Cong-miao*, SUN Hua-yan, ZHAO Yan-zhong, CHEN Jian-biao, REN Jian-ying

(Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

* Corresponding author, E-mail: dandanscmiao@163.com

Abstract: A new method has been proposed to improve the detection and recognition of optical targets using a laser active detection system. The proposed method uses the scanning interference field to transform the spatial distribution of the target into the time distribution of the detected light, and uses the characteristics of the time distribution of the reflected light for identifying optical targets in a complex background. Expressions giving the optical path difference of coherent beams at any point in the far-field interference light field based on the principle of the Mach-Zehnder interferometer, and the fringe spacing in the interference pattern are obtained. The influence of the fringe spacing in the interference pattern on the time distribution of the light intensity at the point of reflection on the original target was analyzed. The results revealed that a decrease in the fringe spacing, while causing an increase in the number of peaks in the time distribution of light reflected from the optical target and a decrease in the peak ratio, resulted in no significant change in the time distribution of light reflected

收稿日期: 2017-07-19; 修订日期: 2017-08-23.

基金项目: 国家重点研发计划专项(No. 2017YFC0822700)

from the diffuse background The variance, skewness, and kurtosis of the time distribution of light reflected from the diffuse background and optical target are evidently different. For example, we have observed kurtosis values of 4.37, 4.03, 3.91, and 62.8, 34.97, 35.4, respectively, for the two time distributions, reflecting an overall difference of one order of magnitude. The results indicate that the large differences in the time distribution of reflected light, envelope shape, and statistical characteristics can be used to easily distinguish between the optical target and diffuse background.

Key words: laser active detection; coherent detection; Mach-Zehnder interferometer; optical target; diffuse reflection

1 引言

当今广泛应用于战场侦察、夜视与观瞄、火控和精确制导等诸多领域的光电装备,其光电系统都是通过一定口径的光学系统将入射光会聚到一个高灵敏度的光电传感器或者是成像器件上,这些光电探测器并不能百分百地吸收入射光,部分入射光会原路返回,这些原路返回光的强度与漫反射光相比要高出很多,这种现象称为光学目标的“猫眼效应”^[1-4]。激光主动探测就是利用这一原理实现对光学目标的探测与定位的。激光主动探测技术主要分为成像探测和非成像探测两大类。非成像探测采用单元探测器接收反射光的强度信号,利用猫眼目标的原路返回光强度比漫反射背景高出 1~2 个数量级的特性实现对目标的快速发现和精确定位。早期的激光主动探测系统都是非成像探测的典型代表,如美国“鲑鱼”车载激光武器系统^[5]和前苏联“拉瑟”车载激光致盲武器系统^[6],其最大作用距离分别为 8 km 和 10 km。然而,随着探测距离的增大,光学目标强反射的优势会逐渐减弱,同时,光学目标反射信号很容易淹没在强反射的复杂背景信号之中,此时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。成像探测利用阵列 CCD 或者 CMOS 成像探测器件,通过分析背景大目标图像来识别威慑特征,不过这种探测方式受到成像器件的规格和性能的限制,作用距离较近,而且还要依赖经验进行判断^[7-13]。

从上述分析可知,无论是成像探测还是非成像探测,都是利用背景与猫眼目标的反射光的强度差对目标进行探测与识别,然而当目标处于强杂散光背景下时,仅仅利用背景与目标的光强差很难有效发现目标,这时就需要其他探测手段来

进一步提高激光主动探测系统强杂光背景下的探测能力。本课题组提出了一种利用相干合成线阵高斯光束扫描识别光学目标的方法^[14],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,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,根据光学目标和漫反射目标对组合光束反射特性的差异,能够从复杂漫反射背景中识别出光学目标。

相干探测技术对探测环境依赖性小,具有较好的抗环境干扰性,能够实现高性能、远距离探测。激光主动干涉探测技术的主要原理为:相干探测激光在目标处形成的干涉场相当于空间分布的二维调制信号,扫描动作向空间分布的干涉场加入时间调制因素,干涉场经过光学目标并原路返回的过程可以看作是光学目标对干涉场的调制过程,这样目标的空间分布信息就加载到目标的反射光时间序列信号中,通过处理反射光信号可以获得光学目标的特征信息。因此,相干光干涉场的分布和目标结构特征共同决定了反射光的时间分布特征。结合以上分析,本文从相干光束发射体制出发,提出了一种基于马赫-曾德尔(M-Z)干涉原理,通过发射主动相干光束从漫反射背景中识别光学目标的方法,利用物理光学的相关知识推导得到了基于 M-Z 干涉原理发射的相干探测光束在目标处形成的远场干涉光场中任一点的光程差和干涉条纹场条纹间距的表达式。结合光学目标和漫反射体的结构特征,利用 Collins 衍射积分公式以及硬边光阑窗口函数分解法,仿真分别得到了干涉光场通过光学目标和朗伯漫反射体反射后其反射光的时间分布结果,并设计实验验证了该主动干涉探测方法从漫反射背景中快速识别光学目标的可行性和有效性。

2 基于 M-Z 干涉的相干光发生体制

相干探测激光在目标处的干涉光场分布影响着原路返回点处目标反射光的时间分布特性,而干涉场中某一点处的干涉场分布是由该点处的光程差决定的。因此,这里以基于 M-Z 干涉原理产生的相干探测光为模型,利用几何光学和物理光学的相关知识,推导了目标所在平面内任一点的光程差的表达式。图 1 为 M-Z 干涉光发生光路。图中, M_0, M_3 为分束比为 1:1 的分束镜, M_1, M_3 为反射镜,4 个镜子尺寸相同且都与水平成 45° 放置,这里将反射镜 M_2 顺时针转动一个很小的角度 α 。高斯光束沿 z 轴方向入射到 M_0 ,经过 M_0 分成振幅相等的两束光 l_1 和 l_2 , α 的存在使得两束光的光轴不再平行,两光束之间形成了 2α 的夹角,从而造成两束光在 P 点产生光程差,并在远场发生干涉。

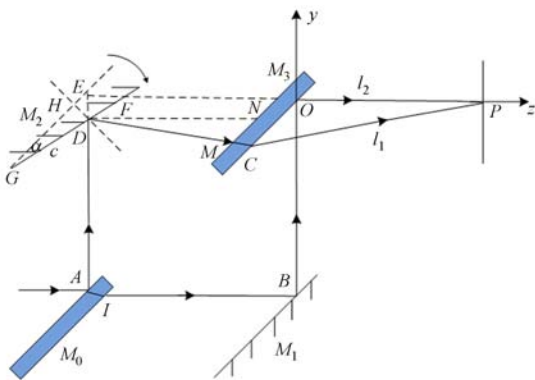


图 1 马赫-泽德干涉光发射装置原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of Mach-Zehnder interferometer

远场探测条件下,目标处任一点 $P(x, y, z)$ 的光程差可以表示为:

$$\Delta S = PC - PO. \quad (1)$$

由式(1)可以得出, ΔS 的推导关键是求出 C 点的位置坐标。如图 1 所示,建立直角坐标系,设镜间距离为 l , $DG = c$, M_0 和 M_3 的厚度为 h ,则 C 点的 y 轴坐标为:

$$y_c = -\sqrt{2} \operatorname{csin} \alpha - \frac{\sin 2\alpha(l - \sqrt{2} \operatorname{csin} \alpha)}{\sin 2\alpha + \cos 2\alpha} - CM \sin \left[\frac{\pi}{4} - \beta \right], \quad (2)$$

式中: β 为 DM 在 M_3 的折射角,根据折射定律有

$$\sin \beta = \frac{\sin \left[\frac{\pi}{4} - 2\alpha \right]}{n}, \quad \text{则} \quad \cos \beta = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \left[\frac{\pi}{4} - 2\alpha \right]}}{n}, \quad CM = \frac{h}{\cos \beta} = \frac{hn}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} - 2\alpha \right)}}.$$

因此,根据三角函数的和差公式得到:

$$CM \sin \left[\frac{\pi}{4} - \beta \right] = \frac{\sqrt{2}}{2} h \left[1 - \frac{\sin \left[\frac{\pi}{4} - 2\alpha \right]}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} - 2\alpha \right)}} \right]. \quad (3)$$

综上所述得到:

$$y_c = -\sqrt{2} \operatorname{csin} \alpha - \frac{\sin 2\alpha(l - \sqrt{2} \operatorname{csin} \alpha)}{\sin 2\alpha + \cos 2\alpha} - \frac{\sqrt{2}}{2} h \left[1 - \frac{\sin \left[\frac{\pi}{4} - 2\alpha \right]}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} - 2\alpha \right)}} \right]. \quad (4)$$

由于 $PC = \sqrt{x^2 + (y - y_c)^2 + (z - y_c)^2}$, $PO = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, 因此:

$$PC^2 - PO^2 = -2y_c y + 2y_c^2 - 2y_c z. \quad (5)$$

则有:

$$\Delta S = PC - PO = \frac{PC^2 - PO^2}{PC + PO} \approx \frac{-2y_c y + 2y_c^2 - 2y_c z}{2z} = -y_c - \frac{y_c y - y_c^2}{z}. \quad (6)$$

式(6)成立是因为实际情况中, $z \gg y_c$, 且在旁轴近似条件下 x 和 y 也比 z 小得多, 则有 $PC + PO \approx 2z$ 成立。

干涉图样的条纹间距 e 是描述干涉场分布的一个重要参数,表示相邻两条亮条纹或暗条纹之间的距离。实际探测中,光程差 ΔS 不能直接测量获得,为将数值计算结果与实验测试结果进行直观比对,引入能够直接测量的 e 。利用 ΔS 与 e 的关系推导得到 e 的表达式。

光强极大值点应该满足条件 $\Delta S = m\lambda$, 光强极小值点应该满足条件 $\Delta S = (m + 1/2)\lambda$, m 为整数,代入式(6)中 ΔS 的表达式可以推导出基于 M-Z 干涉光路形成的干涉图样的条纹间距 e 为:

$$e = -\frac{\lambda z}{y_c}, \quad (7)$$

式中: λ 为激光波长, z 为相干光传输距离。

通常情况下,光学目标可以等效为由两个薄透镜组成的 $4f$ 系统,将该相干高斯光束通过光学目标的光路传输过程展开,如图 2 所示。设相

$$U_1(x_1, y_2, z; t) = \frac{\omega_0}{\omega(z)} \left\{ \exp\left[-\frac{(x_1 - \omega_x z t)^2 + (y_1 + \lambda z / e - \omega_y z t)^2}{2q(z)}\right] \times \exp(-ik y_1 \sin 2\alpha) + \exp\left[-\frac{(x_1 - \omega_x z t)^2 + (y_1 - \omega_y z t)^2}{2q(z)}\right] \right\}, \quad (8)$$

式中,引入 q 参数来简化高斯光束复振幅分布的表达形式,另外:

$$\begin{aligned} \omega(z) &= \omega_0 + z \tan \theta \\ \frac{1}{q(z)} &= \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi \omega^2(z)}, \quad (9) \\ R(z) &= z + \frac{g^2}{z} \end{aligned}$$

e 为式(7)求得的条纹间距; ω_0 为高斯光束的束腰半径,即 $z=0$ 处 ω 的值; θ 为高斯光束的远场发散角, g 为高斯光束的焦参数, $g = \pi \omega_0^2 / \lambda$, k 为高斯光束的波数, $k = 2\pi / \lambda$ 。

相干光经过无离焦的光学目标并原路返回的传输矩阵可以简化为:

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 2f \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

干探测光的扫描角速度为 (ω_x, ω_y) , 将式(7)代入可得到 t 时刻相干探测光波到达透镜 1 前表面时,在目标坐标系内的相干光场的复振幅分布为:

$$\begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中 f 为光学目标透镜的焦距。

参考文献[14]利用 Collins 衍射积分公式和硬边光阑光瞳函数的复高斯函数分解法^[15-16],对相干合成线阵高斯光束通过猫眼目标和朗伯漫反射体后的解析光强分布进行推导,本文利用式(8)推导得到的基于 M-Z 干涉光路产生的相干探测光波到达透镜 1 前表面在目标坐标系内的相干光场的复振幅分布,可以分别推导得到相干光波在经过光学目标和朗伯漫反射体并原路返回到接收平面的复振幅分布,进而得到原路返回的反射光随时间变化的光强分布解析表达。

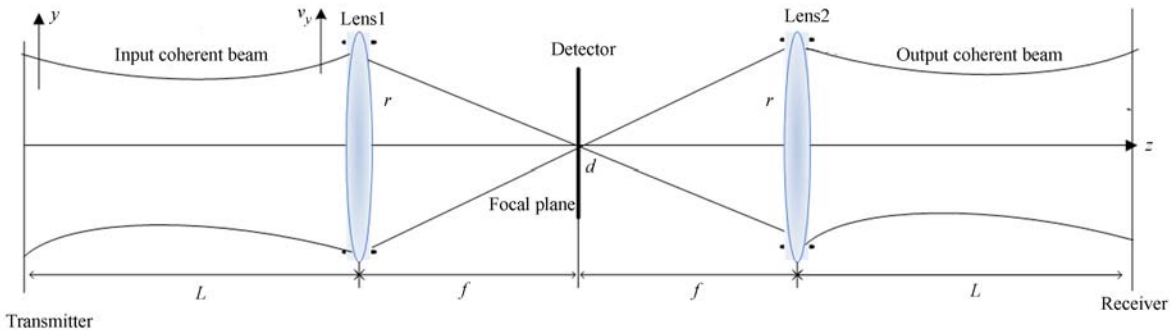


图 2 相干高斯光束经过光学目标的双程传输过程

Fig. 2 Two-way transmission process of coherent Gauss beam through optical target

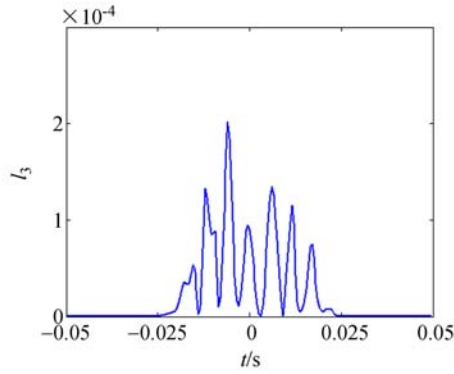
3 数值仿真与分析

相干探测光形成的干涉光场的空间分布直接影响目标反射光的时间分布,因此,这里对干涉条纹场的条纹间距 e 对目标反射光时间分布的影响进行仿真分析。数值仿真的初始条件为:高斯光束的 $\omega_0 = 1$ mm, $\theta = 1.2$ mrad, $\lambda = 532$ nm, $z = 500$ m; M-Z 干涉光发射装置的 $n = 1.5$, $h = 2$ mm, $c = 5$ mm, $l = 5$ cm; 镜头目标 $r = 4$ cm, $f = 30$ cm; 漫

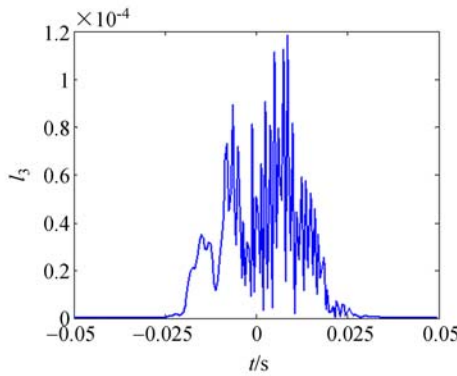
反射屏尺寸为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$; 相干光束的扫描角速度为 $\omega_x = 0$, $\omega_y = 0.01$ rad/s; 干涉光在透镜 1 前表面的人射点重心坐标为 $(0, 0)$, 探测时间 $t = 0.1$ s。

图 3 为 e 改变时光学目标在原路返回点处的反射光的时间分布。由于目标处的干涉光斑由明暗相间的细条纹组成,相当于将目标处光斑的空间分布进行了细化,当目标经过此干涉场时会对干涉场产生调制,这样目标特性就加载到了回波时间序列信号中。由图 3 可知,随着 e 的减小,光

学目标反射光的时间分布也会变得更加细密,峰值数目增多,峰峰值的对比度减小,回波峰值减小。由此表明,光学目标的反射光时间分布包络呈现振荡模式,目标处干涉场的空间条纹间距直接影响着目标反射光时间分布的振荡频率和振荡幅度。



(a) $e=0.04\text{ m}$



(b) $e=0.01\text{ m}$

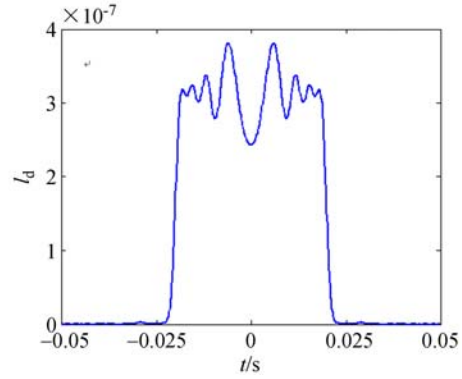
图 3 相干高斯光束反射光时间分布与 e 的关系

Fig. 3 Relations between e and reflected light signal of coherent Gauss beam

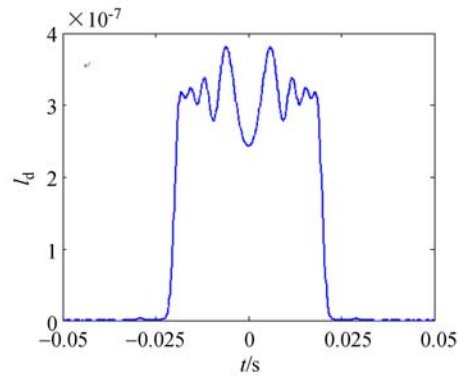
为了分析朗伯漫反射体和光学目标对相干探测激光在目标处形成的干涉场的反射特性在时间分布上是否存在明显差异,图 4 给出了不同 e 时原路返回处的朗伯漫反射体反射光的时间分布曲线。

由图 4 可知,朗伯漫反射体的反射光时间分布的包络形态与光学目标相比没有呈现随时间变化剧烈振荡的形式,包络整体呈现类高斯形态。随着 e 的减小,朗伯漫反射体反射光的时间分布曲线几乎不发生变化,说明目标处干涉场条纹分布的改变并不会改变朗伯反射体的空间均匀反射特性。目标处干涉光强分布的频率特征在返回路径的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。对比图 3 与图 4 可知,朗伯漫反射体与光学目标的反射光时间序列信号的振荡模式明显不同,且对于目标处干涉场条纹间距的变化,光学目标要比漫反射体敏感得多。



(a) $e=0.04\text{ m}$



(b) $e=0.01\text{ m}$

图 4 朗伯体反射光时间分布与 e 的关系

Fig. 4 Relations between e and reflected light signal of Lambertian

4 实验结果及分析

数值分析结果表明,漫反射体和光学目标对探测激光在目标处形成的干涉场的反射特性在时间分布上存在明显差异。为进一步验证在强漫射背景干扰下该方法从漫反射背景中识别光学目标的能力,设计实验测得在漫反射屏和光学镜头的原路返回处反射光的时间序列信号。图 5 和图 6 分别为实验光路的设计图和相干光发射-接收装置。激光发生装置采用单色性和相干性较好,波长为 532 nm 的半导体单纵模激光器,其最大输出功率为 200 mW,发散角为 1.2 mrad,光束直径

为 1.2 mm, M_2 因子小于 1.2, 功率稳定性小于 5%, 噪声均方根小于 1%, 光谱宽度小于 10^{-4}

nm, 相干长度大于 200 m。分束镜的分束比均为 1:1, 探测器的最小可探测功率为 2×10^{-7} W, 光学镜头(光学目标)口径为 8 cm、焦距为 30 cm、全视场角为 5° , 漫反射白板的尺寸为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, 采集卡和计算机用于采集存储信号, 便于进行后续频谱分析等信号处理。整套发射-接收装置集成在一个支撑架尺寸为 $30 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ 的电动旋转平台上, 电动旋转平台放置于小型光学隔振平台上, 通过电动控制实现相干光束的扫描动作。

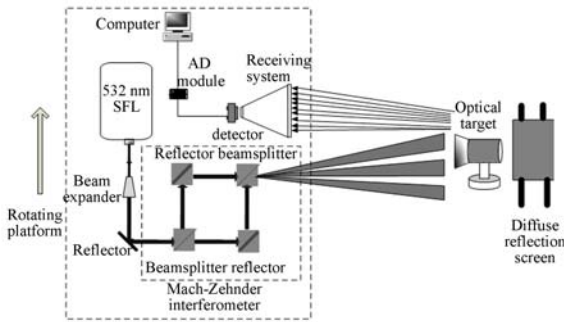


图 5 基于 M-Z 干涉光路探测光学目标实验装置示意图
Fig. 5 Scheme of experimental equipment for optical target recognition based on Mach-Zehnder interferometric optical path

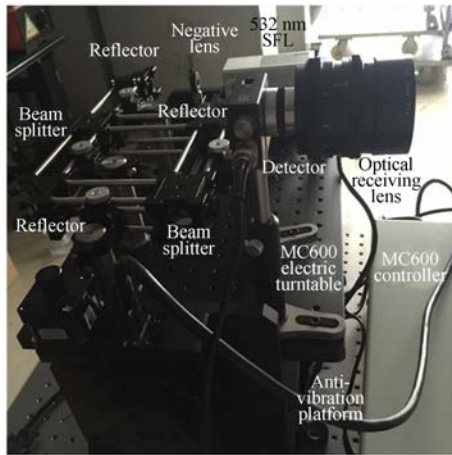
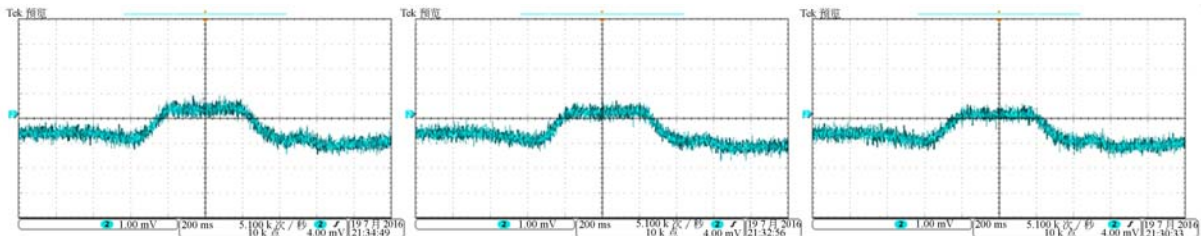


图 6 相干光发射-接收系统

Fig. 6 Photo of coherent beam emission-receiving system

为验证在强背景干扰下该方法从漫反射背景中识别光学目标的能力, 测得在漫反射屏和光学镜头的原路返回处同幅度反射光的时间序列信号, 如图 7 和图 8 所示。实验室内探测距离为 15 m, 目标处干涉光斑面积为 57 cm^2 。干涉图样中的条纹数量和条纹间距成反比, 因此实验中条纹数目的增多恰好对应着数值计算中 e 的减小。

图 7 和图 8 中(a)、(b)和(c)分别对应的条纹数为 10, 32 和 60, 对应的 e 分别约为 6, 2 和 1 cm。从图 7 可以看出, 漫反射屏的反射光的时间序列信号随干涉图样条纹数量的改变无明显变化, 且在条纹数一定时, 反射光时间序列信号呈现平顶高斯形式, 没有明显的振荡起伏变化; 而图 8 中随着干涉图样条纹数的增加, 光学镜头的反射光时间序列包络中包含的峰峰数增多, 信号频率分量增多, 振荡周期减小, 峰峰对比度降低。因此, 可以通过控制干涉光发生装置改变干涉图样的条纹数, 进而根据反射光时间序列信号包络形态中峰峰数随干涉图样条纹数的变化差异将光学目标快速识别出来。



(a) 条纹数为 10 (a) Number of stripes is 10
(b) 条纹数为 32 (b) Number of stripes is 32
(c) 条纹数为 60 (c) Number of stripes is 60

图 7 漫反射屏回波信号

Fig. 7 Echo signal of diffuse reflection screen

为了更加直观地得到镜头目标与漫反射目标对反射光时间分布包络的差异特性, 这里用峰峰比

对反射光光强的振荡变化进行描述。这里根据反射光回波信号的实际分布情况, 采用逐点计算对

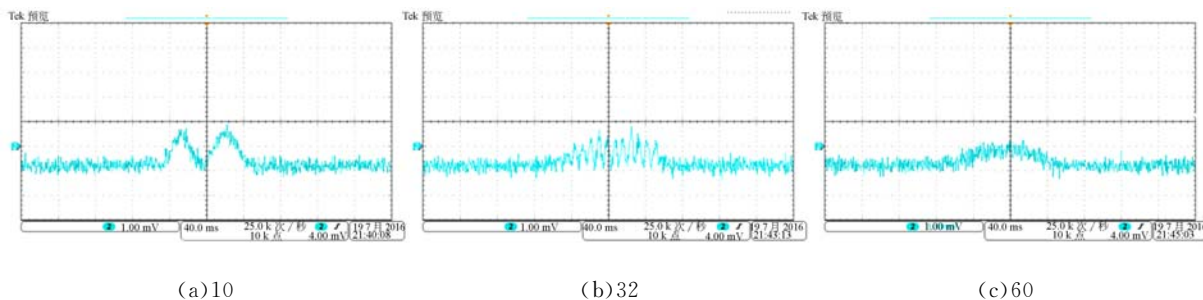


图 8 镜头目标回波信号
Fig. 8 Echo signal of optical lens

比度再取平均值的方法,即对每一对相邻的波峰和波谷值计算对比度再取平均。

图 9 为镜头目标、漫反射屏的反射光时间序列峰峰比和目标处条纹场的对比度随条纹数量的变化情况。由图 9 可知,随着干涉条纹场条纹数量的增多,目标处条纹场的对比度下降,镜头目标反射光时间序列的峰峰比也呈现明显的下降趋势,而漫反射目标的回波峰峰比几乎没有变化。另外,当条纹数量较少时,镜头目标的回波峰峰比高于漫反射目标,说明条纹数量少时镜头回波的振荡幅度较大,振荡现象较为明显。

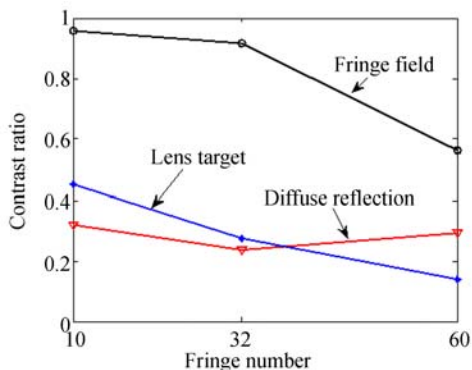


图 9 条纹数量与对比度的变化关系
Fig. 9 Relationship between fringe number and contrast ratio

当探测距离较远时,反射光光强变弱,这时仅仅依靠观察目标的反射光时间分布容易出现误判,因此这里对回波信号的统计特征进行提取,获取更多回波信号的特征信息。首先定义回波信号的偏度和峰度如下:

$$Skew(X) = \frac{E[(X-\mu)^3]}{\sigma^3}, \quad (12)$$

$$\kappa = \frac{E[(X-\mu)^4]}{\sigma^4}, \quad (13)$$

式中: μ 为期望, σ 为标准差。

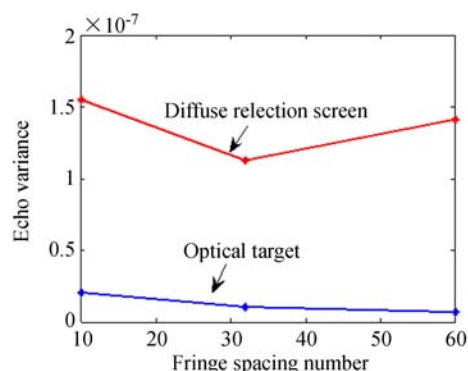


图 10 回波信号方差
Fig. 10 Echo variance

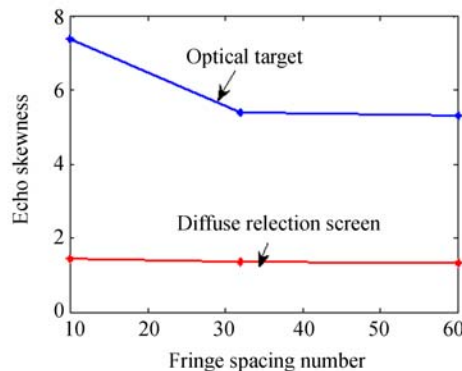


图 11 回波信号偏度
Fig. 11 Echo skewness

图 10、图 11、图 12 分别为镜头目标和漫反射屏的回波信号的方差、偏度、峰度与条纹数之间的关系曲线。从图中不难看出,镜头目标和漫反射屏的回波信号在方差、偏度和峰度上都存在着很大的差异,尤其是回波信号的峰度特征,两者差异十分明显。回波信号的偏度和峰度均表示信号相对于平均值的不对称程度,由于漫反射屏的回波信号形态较为平稳,故其偏度和峰度值几乎不随条

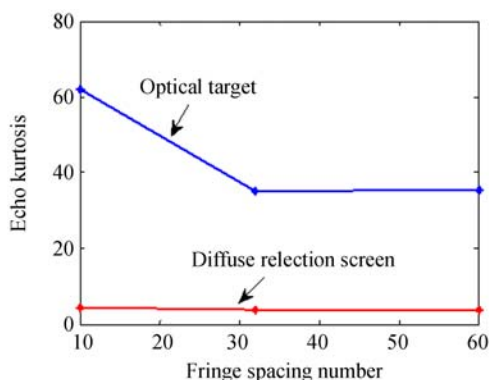


图 12 回波信号峰度

Fig. 12 Echo kurtosis

纹数发生变化,而镜头目标的回波信号包络形态变化明显,这一变化也体现在回波的偏度和峰度上,而回波信号的峰度更是扩大了两者间的这一差异,因此,通过对回波信号进行简单的统计计算就以区分漫反射屏和镜头目标。

5 结 论

本文从相干光束发射体制出发,针对一般的

透射式光学目标,提出了一种基于 M-Z 干涉原理发射主动相干光束从漫反射背景中识别光学目标的方法。该方法将目标的空间分布特征调制在空间分布的干涉场中并转化为可探测的一维时间序列信号,通过对目标反射光时间序列信号的解调获得目标的空间分布特征。对影响反射光时间分布的条纹间距进行了仿真分析,设计实验验证了该主动干涉探测方法从漫反射背景中快速识别光学目标的可行性和有效性。实验得到了条纹数分别为 10,32 和 60 时漫反射屏和镜头目标的回波信号,进一步计算得到了反射光时间分布的峰峰比和干涉图样条纹数的关系,对实验数据进行处理得到了漫反射目标和光学目标的回波信号的方差、偏度和峰度等统计特征。其中,峰度值分别为 (4.37,62.8)、(4.03,34.97)和(3.91,35.4),整体相差一个数量级。实验结果表明,基于 M-Z 干涉光路识别光学目标的方法在强漫反射背景中得到的光学目标和漫反射背景,其反射光时间分布包络形态的峰峰数、峰峰比和峰度等统计特征都存在较大差异,利用这一主动干涉识别方法可快速区分光学目标与漫反射背景。

参考文献:

- [1] LECOCQ C, DESHORS G, LADO-BORDOWSKY O, *et al.*. Sight laser detection modeling [J]. *SPIE*, 2003, 5086: 280-286.
- [2] MIEREMET A L, SCHLEIJPEN R M A, VAN PUTTEN F J M, *et al.*. Retroreflection reduction by masking apertures [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(4): 043202.
- [3] 刘秉琦,周斌,武东生,等. 双通道激光主动探测系统[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 241-246. LIU B Q, ZHOU B, WU D S, *et al.*. Dual-channel active laser detection system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 241-246. (in Chinese)
- [4] REN X M, LI L. Recognizing cat-eye targets with dual criterions of shape and modulation frequency [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(4): 041101.
- [5] HAMBLING D. New sensor-blasting laser; blinding brilliance? [EB/OL]. (2008-01-14) [2018-02-05]. <http://www.wired.com/dangerroom/2008/01/new-sensor-blas/>.
- [6] 时家明,王峰. 国外陆军光电对抗装备综述[J]. *现代军事*, 2005(10):40-42.
- [7] SHI J M, WANG F. Review of foreign army photoelectric countermeasure equipment [J]. *Commilit*, 2005(10): 40-42. (in Chinese)
- [8] CILAS. SLD 500 counter sniper systems delivered to the us marines [EB/OL]. (2009-07-10) [2018-02-05]. <http://www.defencetalk.com/sld-500-counter-sniper-systems-delivered-to-the-us-marines-19631/>.
- [9] BOBOLICU G. Snipers pinpointed by ellipse before they shoot [EB/OL]. (2009-01-14) [2018-02-05]. <http://gadgets.softpedia.com/news/Snipers-Pinpointed-Before-They-Shoot-by-Ellipse-752-01.html>.
- [10] GLARES-Gated laser retro-reflection scanner [EB/OL]. (2010-03-05) [2018-02-05]. <http://www.valcartier.drdc-rddc.gc.ca/sciences/glaires-eng.asp>.
- [11] MIEREMET A L, SCHLEIJPEN R M A, VAN PUTTEN F J M, *et al.*. Retroreflection reduction by masking apertures [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(4): 043202.
- [12] 王灿进,孙涛,石宁宁,等. 基于双隐层 BP 算

- 法的激光主动成像识别系统[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6): 1639-1647.
- WANG C J, SUN T, SHI N N, *et al.*. Laser active imaging and recognition system based on double hidden layer BP algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1639-1647. (in Chinese)
- [12] 徐正平, 沈宏海, 姚园, 等. 直接测距型无扫描激光主动成像验证系统[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2): 251-259.
- XU ZH P, SHEN H H, YAO Y, *et al.*. Scannerless laser active imaging validating system by directly ranging[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2): 251-259. (in Chinese)
- [13] THOLL H D, VERGNOLLE J F. CASAM: a European R&T project for the protection of commercial aircrafts in flight[J]. *SPIE*, 2008, 7115: 711509.
- [14] ZHAO Y ZH, SUN H Y, SHAN C M, *et al.*. A new identification method aimed at optical targets using an active interference laser beam[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(10): 1019-1022.
- [15] FENG Y J, ZHANG R ZH, ZHANG B. Propagation properties of the beam generated by Gaussian mirror resonator passing through a paraxial ABCD optical system[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(4): 662-668.
- [16] CHEN S H, ZHANG T R, FENG X F. Propagation properties of cosh-squared-Gaussian beam through fractional Fourier transform systems[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(6): 1083-1087.

作者简介:



单聪淼(1988—),女,吉林长春人,博士研究生,2014年于中国人民解放军装备学院获得硕士学位,主要从事激光主动探测、光学信息获取与处理的研究。
E-mail: dandanscmiao@163.com

导师简介:



孙华燕(1963—),女,山东荣城人,教授,曾获多项部委级科技进步奖,主要从事光电信息处理与对抗的研究。
E-mail: shy221528@vip.sina.com