

doi:10.3788/gzxb20174612.1214002

# 激光主动干涉条纹间距识别光学目标口径

单聪淼, 孙华燕, 赵延仲, 陈建彪, 李帅

(装备学院, 北京 101416)

**摘 要:**利用物理光学相关知识及 Collins 衍射积分公式和硬边光阑的复高斯函数分解法, 推导得到目标处干涉图样条纹间距与光学目标反射光时间分布关系的解析表达式. 从原理分析、仿真计算和实验研究等方面研究了干涉场的条纹间距、光学目标口径参数和反射光时间分布包络的峰峰数、峰峰间距和峰峰比之间定量关系. 结果表明, 当条纹间距的大小约为目标的口径尺寸时, 反射光时间分布包络的峰峰数由单峰向多峰过渡, 峰峰间距和峰峰比曲线会出现极大值, 根据这一变化规律可以估测出光学目标的口径参数, 其估测精度受条纹间距可调节范围的影响.

**关键词:**激光主动干涉探测; 光学目标口径; 条纹间距; 峰峰间距; 峰峰比

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)12-1214002-9

## Identification Method of the Optical Target Aperture by Laser Active Interference Fringe Spacing

SHAN Cong-miao, SUN Hua-yan, ZHAO Yan-zhong, CHEN Jian-biao, LI Shuai

(Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

**Abstract:** The analytical expression of the relationship between interference fringe spacing of target pattern and light time distribution of optical target reflection was derived by using the related knowledge of physical optics, Collins diffraction integral formula and the hard edge aperture complex Gauss function decomposition method. The quantitative relationship between interference field fringe spacing, optical aperture size and target reflected light time distribution of envelope peak number, peak to peak spacing and peak to peak ratio was discussed from the aspect of principle analysis, simulation and experimental. The results show that when the fringe spacing is about the size of the target aperture, the peak number of reflected light time distribution envelope is from single peak to multi peaks, and the peak to peak spacing and peak to peak ratio curves appear a maximum value. The estimation results of the aperture parameters can be deduced according to the change rule of parameters mentioned above, its accuracy is affected by the fringe spacing adjustable range.

**Key words:** Active coherent detection; Optical target aperture; Interference fringe spacing; Peak to peak spacing; Peak to peak ratio

**OCIS Codes:** 140.0140; 070.6020; 070.4560

## 0 引言

基于“猫眼效应”激光主动探测的技术原理是利用光学探测设备焦平面处安装的反射或半反射元件对人

基金项目: 国家自然科学基金(No.61302183)资助

第一作者: 单聪淼(1988-), 女, 博士研究生, 研究方向为激光主动探测、光学信息获取与处理. Email: dandanscmiao@163.com

导师(通讯作者): 孙华燕(1963-), 女, 教授, 博导, 主要研究方向为激光主动探测、光电信息处理方面等. Email: shy221528@vip.sina.com

收稿日期: 2017-05-12; 录用日期: 2017-08-18

<http://www.photon.ac.cn>

射激光的原路返回特性,实现从漫反射背景中对光学目标的有效发现和快速定位<sup>[1-2]</sup>.光学目标“猫眼效应”的研究主要分为非成像探测和成像探测两大类.非成像探测手段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个数量级的这一特性,实现对威慑目标的探测与定位,其优点是不需要对回波信号进行复杂的计算处理,就可以完成对光学目标的快速发现.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<sup>[3]</sup>和前苏联“拉瑟”车载激光致盲武器系统<sup>[4]</sup>,最大作用距离分别为8 km和10 km.然而,这一手段只能实现对光学目标的探测发现,不能对目标的特征参数进行识别.另外,当背景信号较强时,光学目标反射信号很容易淹没在强反射背景信号之中,此时仅仅依靠反射光的强度探测威慑目标的存在已经不具有优势.为了获得更多的目标特征信息,提高激光主动探测系统的智能识别能力,研究者开展了针对猫眼目标反射光的空间分布特征<sup>[5-8]</sup>、激光主动探测系统性能<sup>[9-11]</sup>、大气湍流影响<sup>[12-13]</sup>等研究.加拿大的舰载后向激光扫描仪,利用选通成像大大提高对光学目标的探测定位能力<sup>[14]</sup>,文献<sup>[15]</sup>研究了基于形状和纹理特征的猫眼目标图像识别算法.由于成像探测器件性能的限制,成像探测手段的探测距离难以提升;基于图像特征的识别方法需要复杂的算法来实现,不能实时快速识别.因此,文献<sup>[16]</sup>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光学目标的新方法,该方法利用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快速识别出光学目标,突破了以往单纯依靠光强幅度的差异发现定位光学目标的探测方式.

然而,如何将猫眼效应反射光的空间分布转化为可远距离测量的时间序列信号,从而获取光学目标更多的特征信息是这一方法的关键所在.本文在文献<sup>[16]</sup>的基础上进一步开展光学目标特征参数识别的研究,从原理分析、仿真计算和实验研究等方面论证了利用干涉场的条纹间距、光学目标口径参数和反射光时间分布包络的峰峰数、峰峰间距和峰峰比之间定量关系来估算目标口径参数的可行性,为光学目标的特征识别方法提供了新思路.

## 1 理论分析

基于相干合成高斯光束的激光主动干涉扫描识别光学目标的主要思路是:通过控制两束相干探测激光之间的光程差,从而精确控制相干探测光在目标所在平面形成空间分布的干涉条纹场,利用扫描动作将光学目标的空间分布信息加载到干涉条纹场中,并通过光学目标的“猫眼效应”将此空间调制过程原路返回为有效的时间序列信号.此时,目标处空间分布的干涉场类似于一个二维空间载波,因此,如何通过控制干涉场的分布将光学目标的空间分布特征有效地加载到干涉场中,并通过反射光的时间分布将目标的空间分布参数解调出来是激光主动干涉扫描识别光学目标的方法关键所在.

条纹间距是指干涉图样上两个相邻亮条纹或暗条纹之间的距离,即相邻的光强极大值点或极小值点间的间距.图1为基于相干合成高斯光束激光主动干涉扫描识别光学目标原理.图中针对同一光学目标进行扫描识别.

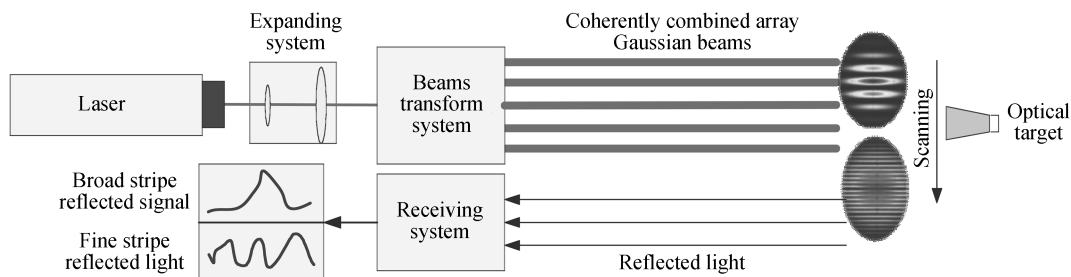


图1 激光主动干涉扫描识别光学目标口径的原理

Fig.1 The principle of laser active interference scanning to identify optical target aperture

通过光束转换系统改变目标处干涉场的空间分布,目标的空间特征与空间干涉场的变化的共同作用会体现在目标的反射光中,对反射光时间分布进行特征分析,进而提取目标的特征参数.当条纹较宽时,目标的口径落在一组亮暗条纹之间,当上一级亮条纹随着扫描动作逐渐移出镜头时,下一级的亮条纹会逐渐进入镜头,镜头中始终存在一组亮暗条纹,此时的反射光时间分布呈现类高斯的连续变化.条纹间距减小,目标口径覆盖几组亮暗条纹,其反射光时间分布的包络呈现振荡变化,同一时刻进入镜头的亮条纹的波峰光强被同时

进入镜头的暗条纹的谷值光强平均,使得反射光的时间分布的峰值光强整体下降、谷值光强整体上升,峰峰值对比度下降。

振幅相等的两束相干光在距离为  $L$  处的目标所在平面形成的干涉条纹场的条纹间距为

$$e = \frac{(m+1)\lambda L}{d} - \frac{m\lambda L}{d} = \frac{\lambda L}{d} \quad (1)$$

式中,条纹间距  $e$  是激光波长  $\lambda$ 、传输距离  $L$  和光束间距离  $d$  的函数。

以基模高斯光束为模型,分析干涉探测光扫描经过光学目标并原路返回的过程.如图 2 所示,设两束振幅相等的基模高斯光束分别从沿  $y$  轴距离为  $d$  的  $S_1$  和  $S_2$  发出,并且  $S_1$  和  $S_2$  到原点距离相等均为  $d/2$ ,两束光到距离为  $L$  的目标所在平面内的任一点  $P(x, y, L)$  的光程分别为  $r_1$  和  $r_2$ 。

为便于后面的复杂公式推导,引入  $q$  参数来简化高斯光束光场的表达形式.则两束相干光在目标处的复振幅分布可以分别表示为

$$U_{s_1}(x, y, L) = \frac{\omega_0}{\omega(L)} \exp\left[-ik \frac{x^2 + (y - d/2)^2}{2q(L)}\right] \quad (2)$$

$$U_{s_2}(x, y, L) = \frac{\omega_0}{\omega(L)} \exp\left[-ik \frac{x^2 + (y + d/2)^2}{2q(L)}\right] \quad (3)$$

式中

$$\begin{cases} \omega(L) = \omega_0 + L \tan\theta \\ R(L) = L + g^2/L \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{1}{q(L)} = \frac{1}{R(L)} - i \frac{\lambda}{\pi\omega^2(L)} \quad (5)$$

式中,  $\omega_0$  为高斯光束的束腰半径,即  $L=0$  处的  $\omega$  的值;  $\theta$  为高斯光束发散角;  $g$  为高斯光束的焦参数,  $g = \pi\omega_0^2/\lambda$ 。

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 3。

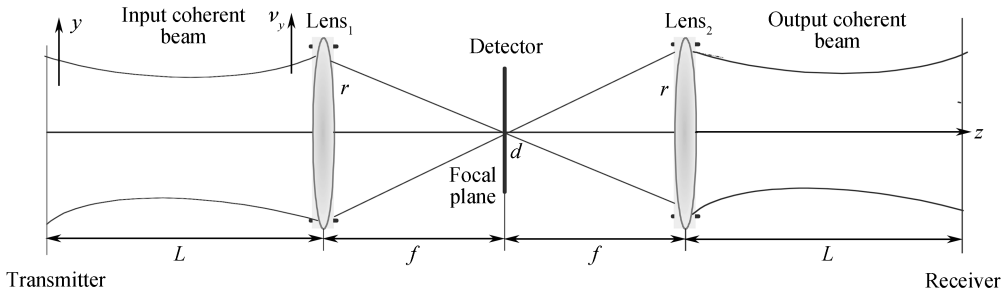


图 3 相干高斯光束经过光学目标双程传输过程

Fig.3 Two-way transmission process of coherent Gaussian beams passing through optical target

设相干探测光的扫描角速度为  $(\omega_x, \omega_y)$ , 故时刻  $t$  时,相干探测光波到达  $Len_1$  前表面在目标坐标系内的相干光场的复振幅分布为

$$U_1(x_1, y_1, L; t) = U_{s_1}(x, y, L; t) + U_{s_2}(x, y, L; t) = \frac{\omega_0}{\omega(L)} \cdot \left\{ \exp\left[-ik \frac{(x_1 - \omega_x Lt)^2 + (y_1 - d/2 - \omega_y Lt)^2}{2q(L)}\right] + \exp\left[-ik \frac{(x_1 - \omega_x Lt)^2 + (y_1 + d/2 - \omega_y Lt)^2}{2q(L)}\right] \right\} \quad (6)$$

相干光束经过无离焦的折返式光学目标并且原路返回的传输矩阵可以简化为

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 2f \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于相干探测激光进入目标的时间非常短,可以认为在相干光进入目标到从目标射出的这个过程中目标与探测光束间无相对运动.利用高斯函数叠加的方法来拟合硬边光阑的窗口函数<sup>[15-16]</sup>,则等效光阑 1、2 的窗口函数展开为复高斯函数之和的形式为

$$W(x, y) = \sum_{m=1}^M F_m \exp\left\{-\frac{G_m}{r^2}[x^2 + y^2]\right\} \quad (9)$$

式中,  $r$  为光学目标的半口径;  $F_m$  和  $G_m$  均为硬边光阑的展开系数.

则利用 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,可以推导出相干光波经过猫眼目标并且原路返回的在接收屏平面的复振幅分布为

$$\begin{aligned} U_3(x_3, y_3, 0; t) = & -\frac{k^2 \omega_0}{8Lf\omega(L)} \exp(-i2kL) \exp\left[-\frac{ik}{2L}(x_3^2 + y_3^2)\right] \times \\ & \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M \frac{F_n F_m}{P_{3x}^2 P_{2x}^2} \left\{ \exp\left[-ik \frac{(\omega_x Lt)^2 + (d/2 + \omega_y Lt)^2}{2q(L)}\right] \cdot \exp\left(\frac{Q_{2x}^2 + Q_{2y}^2}{4P_{2x}^2}\right) \times \right. \\ \exp\left\{-\frac{k^2}{4L^2 P_{3x}^2} \left[ \left(x_3 - \frac{1}{4fP_{2x}^2} Q_{2x}\right)^2 + \left(y_3 - \frac{L}{4fP_{2x}^2} Q_{2y}\right)^2 \right] \right\} & + \exp\left[-ik \frac{(\omega_x Lt)^2 + (d/2 - \omega_y Lt)^2}{2q(z)}\right] \cdot \\ \exp\left(\frac{Q_{2x}^2}{4P_{2x}^2} + \frac{Q_{22y}^2}{4P_{2y}^2}\right) \times \exp\left\{-\frac{k^2}{4L^2 P_{3x}^2} \left[ \left(x_3 - \frac{L}{4fP_{2x}^2} Q_{2x}\right)^2 + \left(y_3 - \frac{L}{4fP_{2x}^2} Q_{22y}\right)^2 \right] \right\} & \left. \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

式中

$$\begin{cases} P_{2x}^2 = \frac{ik}{2q(L)} - \frac{ik}{4f} + \frac{G_m}{r^2}, P_{3x}^2 = -\frac{ik}{4f} + \frac{k^2}{16f^2 P_{2x}^2} + \frac{ik}{2L} + \frac{G_n}{r^2} \\ Q_{2x} = -\frac{ik\omega_x Lt}{q(L)}, Q_{2y} = -\frac{ik(d/2 + \omega_y Lt)}{q(L)}, Q_{22y} = -\frac{ik(-d/2 + \omega_y Lt)}{q(L)} \end{cases} \quad (11)$$

则时刻  $t$  时,原路返回点处的光强分布为

$$I_3(0, 0, 0; t) = U_3(0, 0, 0; t) U_3^*(0, 0, 0; t) \quad (12)$$

故而,得到了目标处于干涉条纹场的条纹间距  $e$  与原路返回点处的反射光光强的时间序列信号的解析关系.

## 2 实验设计与结果分析

从数值仿真和实验的角度对条纹间距识别光学目标口径参数的方法作进一步的研究分析,数值仿真的初始条件为高斯光束的束腰半径  $\omega_0 = 1.2$  mm,发散角  $\theta = 1.2$  mrad,激光波长  $\lambda = 532$  nm,镜头目标  $r = 4$  cm,  $f = 30$  cm,探测距离  $L = 475$  m,相干光束的扫描角速度为  $\omega_x = 0, \omega_y = 0.01$  rad/s,探测时间  $t = 0.1$  s.

实验方案和实验装置分别见图4和5.由于实验室内空间的限制,在激光器出光口处放置一个透镜作为

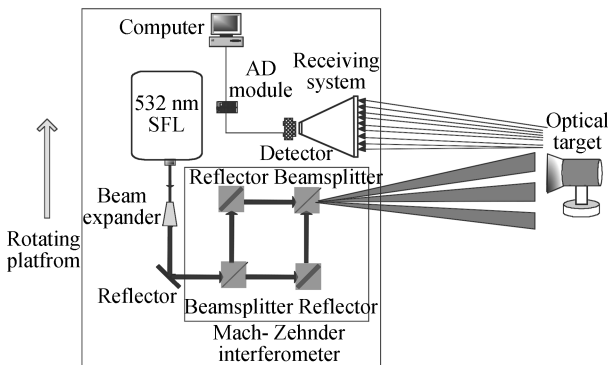


图4 实验装置

Fig.4 Scheme of experimental equipment

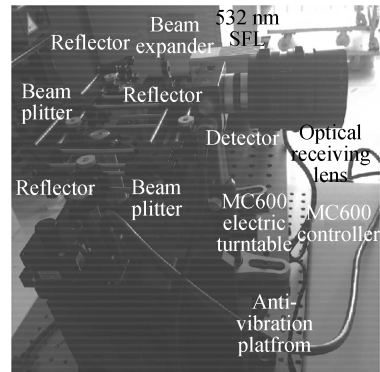


图5 相干光发射-接收系统

Fig.5 Coherent beams emission-receiving system

扩束装置,可以在较短的探测距离里获得足够大的干涉光斑,从而实现条纹间距的大范围调节.实验中采用相干性较好的 532 nm 单纵模激光器作为光源,发射激光经过扩束镜扩束、反射镜改变光路方向进入相干光发射装置,相干光发射装置由两个分束镜和两个反射镜组成,其中反射镜起改变光路的作用、分束镜起获得振动频率和方向相同的相干光束的作用,通过调节反射镜角度的微小偏转改变两束光之间的光程差,进而实现对目标处干涉图样条纹间距的控制.到达目标处的相干探测光经过光学镜头原路反射回来,采用光学镜头和光电倍增管的组合作为反射光的光学接收系统,利用探测器组件接收反射光信号,为直观的获得原路返回点处的反射光的时间序列信号,减少后续计算量,实验中采用单元探测器,并将探测器与相干光发射装置集成在一起,示波器可以直观的观察目标回波的时间序列信号,高速采集卡和计算机可以将信号采集存储并进行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 cm×60 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,这样的设计使得整套实验装置灵活轻便,便于后续远距离外场实验的开展.为了使光源具备较好的单色性和相干性,采用波长为 532 nm 的半导体单纵模连续激光器,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,经过扩束后的激光全发散角为 3.8 mrad.探测器最小可探测功率为  $2 \times 10^{-7}$  W,光学镜头(光学目标)口径为 8 cm、焦距为 100 cm、全视场角为  $5^\circ$ .

### 2.1 反射光时间分布峰峰数与条纹间距的关系

实验室内的探测距离为 15 m,目标处的光斑直径为 57 cm.在实际探测中,目标处的光斑直径可以通过探测激光发散角和传输距离估算得到.改变反射镜偏转角可以使得干涉图样的条纹数量发生从少到多的连续变化,实验发现,当条纹数较少时,条纹数量的微小变化都会引起原路返回点处的时间序列信号发生明显变化,当条纹数增大到一定数量时,镜头目标反射光的时间序列信号对条纹数量的改变的敏感程度减弱.

图 6 为条纹数量改变时镜头目标反射光时间序列信号.由图可知,目标处干涉图样的条纹数量发生改变会使得镜头目标反射光时间分布的包络形态发生明显变化.当亮条纹数量在 3~10 连续增多时,亮条纹数量小于 6 时,反射光时间序列的包络均为单峰形态;亮条纹数量在 6~10 之间变化时,镜头目标反射光时间序列信号的包络会出现由单峰递增到三峰的现象.目标反射光时间序列信号包络从单峰到双峰的突变是在条纹数量从 6 变化到 7 时出现的,如图 6(a)和(b),经计算亮条纹数量 6 所对应的条纹间距约为 90 mm,条纹数量 7 所对应的一组亮暗条纹间距约为 80 mm,镜头口径实际为 80 mm,不难看出,目标反射光时间序列信号包络从单峰到双峰的突变点与目标口径密切相关,可以通过控制条纹数量达到利用条纹间距反推目标口径范围的目的.

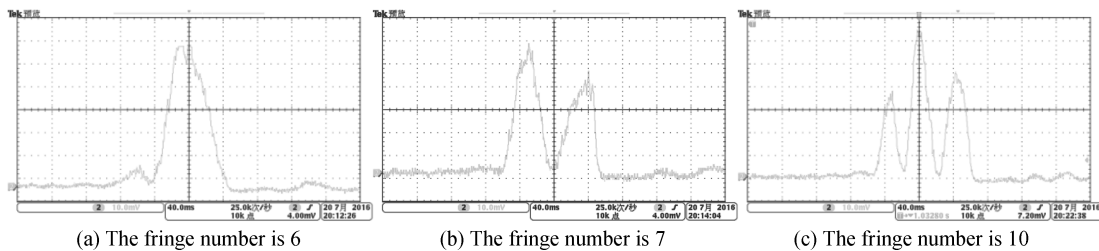


图 6 条纹数量 3~10 时镜头目标反射光时间序列信号

Fig.6 Echo signal of optical lens target at the fringe number between 3~10

图 7 为亮条纹数量在 10 以上持续增长时镜头目标反射光时间分布.随着亮条纹数量的大幅度增加,反射光时间序列信号包络中的峰峰数持续增加,而回波信号的平均峰值功率呈现减小的趋势,且峰峰比也在逐渐减小,当条纹数量增加到 90 时,回波信号的后端已有部分回波信号的振荡特性消失,出现类似于高斯形态的平滑轮廓.这是由于一定尺寸口径内可以包含目标处干涉光强分布的多个频率点信息,随着条纹数增多、条纹间距减小,进入目标的频率点数量也在增加,这些多频率点信息在通过光学目标并反射回原路返回处的传输过程中被平均化,导致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增多,体现在目标反射光时间序列信号上即为峰峰对比度降低,且当条纹数量增加到一定程度时,峰峰对比度已无法识别,回波信号包络呈现为类高斯的平滑曲线.

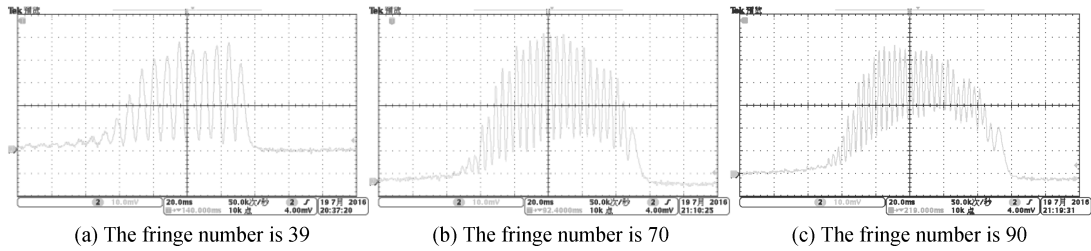


图7 条纹数量10以上时镜头目标反射光时间序列信号

Fig.7 Echo signal of optical lens target at the fringe number above 10

## 2.2 反射光时间分布峰峰间距和峰峰比与条纹间距的关系

基于反射光时间分布包络的峰峰数识别光学目标口径的方法容易观察,但在实际探测中会因为杂散光干扰、阈值选取及判读误差等带来许多不确定因素,为提高该方法的估测精度,提取反射光时间序列的峰峰间距与峰峰比特征对目标口径参数进行估测.图8为干涉条纹场的条纹间距与反射光时间序列峰峰间距之间的关系.图8(a)为由式(12)得到的数值仿真结果,图8(b)为实验计算结果.

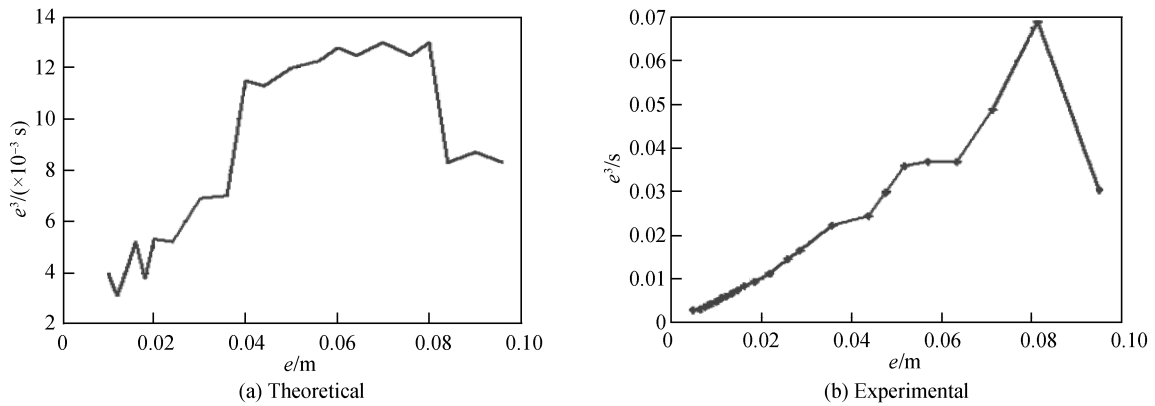


图8 条纹间距与镜头目标反射光时间序列信号峰峰间距的关系

Fig.8 Relationship between fringe spacing and the peak to peak spacing of the optical target time-series signal

由图8可知,理论仿真与实验计算结果的曲线在整体变化趋势上是相同的,都是整体上呈现为先上升后下降的趋势.由于扫描时间的不同,反射光的峰峰间距存在量级上的差异,但并不影响利用该识别光学目标口径方法的应用.理论结果采样点较多,反射光的时间序列包络的峰峰数随条纹间距增大呈现连续递减,因此在图8(a)中会出现一段类似于平台的缓慢增长过程.对于口径尺寸为8cm的镜头目标,理论仿真结果和实验计算结果均在 $e=0.08$  m处获得极大值.由于条纹数量增加和条纹间距增大是两个相反的过程,干涉条纹场的条纹间距增大,反射光时间序列包络的峰值数量减少,而峰峰间距增大,这个过程持续到反射光时间序列包络变为单峰;当反射光时间序列包络变为单峰,峰峰间距迅速下降,而反射光时间序列包络形态由双峰变为单峰的突变态恰恰出现在干涉条纹场的条纹间距与目标的口径尺寸大小相比拟的时候.根据这一发现可以通过调节干涉场的条纹间距,建立条纹间距与反射光时间序列包络的峰峰间距的关系,并以此来推断出光学目标的口径尺寸.从以上分析我们不难看出,条纹间距的可调范围直接影响到估测范围的准确性和精确度.

反射光时间序列包络的峰峰间距反映的是反射光时间分布整体的变化趋势,与某一点的光强变化无关.为了建立反射光时间序列中每一点的光强随干涉图样条纹间距的变化关系,这里我们借助于干涉场的条纹对比度的定义,来对反射光时间序列包络的峰峰比定义.干涉场中某一点 $P$ 附近的条纹清晰程度用条纹对比度(也称可见度) $K$ 来表示.

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (13)$$

式中, $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别表示 $P$ 点附近条纹强度的极大值和极小值.式(13)表明,条纹对比度是在 $0\sim 1$ 之间变化的.根据反射光回波信号分布的实际情况,采用逐点计算对比度的方法再取平均值的方法,即对每一对相邻的波峰值和波谷值计算对比度再取平均.图9为干涉条纹场的条纹间距与反射光时间序列峰峰比之间的关系.图9(a)为由式(12)得到的数值仿真结果,图9(b)为实验计算结果.

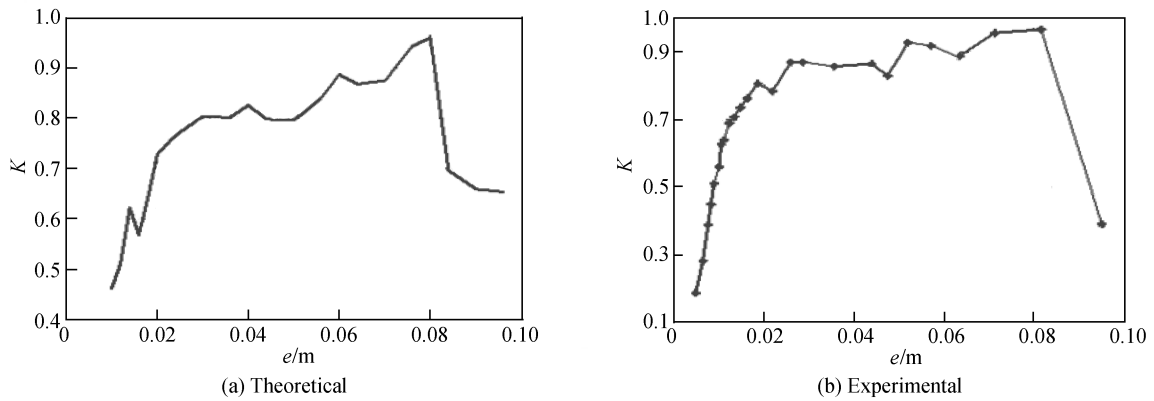


图9 条纹间距与镜头目标反射光时间序列信号峰峰比的关系

Fig.9 Relationship between fringe spacing and the peak to peak ratio of the optical target time-series signal

由图9可知,理论仿真与实验计算的结果的曲线在整体变化趋势上是相同的,都是整体上呈现为先上升中间变化平缓后下降的趋势.当条纹间距较小时,反射光时间分布的波峰的峰值光强整体减小、波谷的峰值光强整体增大,此时的峰峰比数值较小;随着条纹间距的增大,反射光时间分布的波峰的峰值光强整体增大、波谷的峰值光强整体减小,此时的峰峰比数值增大.当条纹间距增大到0.08 m,即与镜头目标口径尺寸相等时,反射光时间序列的峰峰比会突然下降,这是由于当条纹间距增大到目标口径尺寸附近时,此时的反射光时间序列包络的形态发生由多峰向单峰突变的现象,当反射光时间序列包络变为单峰时,峰峰比迅速下降.因此,可以利用条纹间距与反射光时间序列包络的峰峰间距和峰峰比的关系曲线在目标口径附近的骤降规律来推断出光学目标的口径尺寸.

实验测试中,在镜头目标前放置一个可调节通光孔径的光阑模拟不同大小口径的光学目标,每一尺寸的光学目标进行三组重复实验,计算每组测试结果的峰峰间距和峰峰比,对三组数据取平均值的结果如表1和表2所示.表1和表2中的NaN表示值为空.反射光时间分布的包络呈现单峰形态时,波谷个数记为0,根据峰峰间距和峰峰比的计算方法可知,此时的峰峰间距和峰峰比的值不存在,记为NaN空值.

表1 不同尺寸口径目标的反射光时间分布的峰峰间距

Table 1 Peak to peak spacing of reflected light time distribution for different size targets

Stripe number D/mm	5	6	7	8	9	10	13	22	33	48
10	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.014 0	0.010 0	0.005 6	0.005 0	NaN
20	NaN	NaN	NaN	0.015 3	0.016 5	0.013 5	0.010 3	0.005 8	0.005 5	0.005 5
30	NaN	NaN	NaN	0.015 7	0.016 3	0.014 0	0.010 0	0.005 8	0.005 4	0.005 4
40	NaN	NaN	NaN	0.017 0	0.017 0	0.015 3	0.018 3	0.005 8	0.006 4	0.006 4
50	NaN	NaN	NaN	0.017 0	0.017 7	0.016 2	0.011 2	0.005 6	0.006 2	0.006 0
60	NaN	0.029 0	0.018 7	0.017 0	0.018 0	0.014 3	0.010 5	0.005 5	0.005 7	0.005 5

表2 不同尺寸口径目标的反射光时间分布的峰峰比

Table 2 Peak to peak ratio of reflected light time distribution for different size targets

Stripe number D/mm	5	6	7	8	9	10	13	22	33	48
10	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.700 2	0.675 8	0.715 5	0.319 8	NaN
20	NaN	NaN	NaN	0.671 0	0.800 6	0.788 1	0.710 6	0.726 8	0.379 1	0.361 6
30	NaN	NaN	NaN	0.716 5	0.661 5	0.776 1	0.683 4	0.620 3	0.352 7	0.303 1
40	NaN	NaN	NaN	0.828 1	0.768 8	0.832 1	0.774 0	0.565 7	0.250 2	0.276 1
50	NaN	NaN	NaN	0.901 6	0.872 7	0.869 0	0.792 0	0.421 7	0.290 7	0.315 0
60	NaN	0.565 2	0.578 3	0.620 6	0.735 9	0.682 0	0.573 6	0.368 0	0.276 3	0.303 2

观察表1和表2中横向数据,发现任一口径尺寸的镜头目标,由于条纹间距随条纹数量的增加而减小,进入目标的干涉场分布变得细密,因此其反射光时间分布的峰峰间距随着条纹数量的增加而减小,峰峰比随

着条纹数量的增加先增大后减小.观察表 1 和表 2 中纵向数据,发现对于相同的条纹数量,反射光时间分布的峰峰间距和峰峰比随着镜头口径的增大而增大.根据表中测试结果的分布情况,可以将不同口径目标分成 3 组,分别为  $D=10$  mm 的目标为第 1 组, $D=20\sim 50$  mm 的目标为第 2 组, $D=60$  mm 的目标为第三组.

### 3 结论

基于相干合成线阵高斯光束激光主动干涉探测,按照从漫反射背景中识别光学目标的方法,分析了激光主动干涉探测识别方法的原理,开展了光学目标口径参数识别的研究.研究发现:干涉条纹场的条纹间距与光学目标的口径参数之间存在映射关系,且可以通过反射光时间分布的峰峰数、峰峰间距和峰峰比体现.条纹间距的大小约等于目标的口径尺寸时,反射光时间分布包络的峰峰数在 1 和 2 之间跃变,峰峰间距和峰峰比曲线会出现极大值,根据这一变化规律可以估测出光学目标的口径参数.这一目标口径估测方法的关键是如何通过控制条纹数量找到目标反射光时间序列信号特征参数突变的临界点,而条纹间距的调节范围主要受干涉光斑尺寸的限制,当条纹数较少时,条纹数量的微小变化都会引起原路返回点处的时间序列信号发生明显变化,此时的估测精度较高,当条纹数增大到一定数量时,镜头目标反射光的时间序列信号对条纹数量的改变的敏感程度减弱.所得结果丰富了激光主动干涉探测识别技术的应用领域,同时为光学目标的特征识别方法提供了新思路.

#### 参考文献

- [1] LECOCQ C, DESHORS G, LADO-BORDOWSKY O, *et al.* Sight laser detection modeling[C]. 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): 1794-1802.
- [3] HAMBLING D. New sensor-blasting laser; blinding brilliance? [EB/OL]. <http://www.wired.com/dangerroom/2008/01/new-sensor-blas/>, 2008-01-14.
- [4] SHI Jia-ming, WANG Feng. Review of foreign army photoelectric countermeasure equipment[J]. *Conmilit*, 2005, (10): 40-42.  
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.
- [5] ZHAO Yan-zhong SUN Hua-yan, ZHANG Lai-xian, *et al.* Backwards propagation characteristics of distorted reflected beams with cat-eye effect[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(7): 85-92.  
赵延伸,孙华燕,张来线,等. 畸变猫眼效应反射光束的回程传输特性[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 85-92.
- [6] LIU Bing-qi, ZHOU Bin, ZHANG Yue, *et al.* Stealth technology of "cat-eye" target based on circular holes Array's modulation[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2012, **39**(3): 1-6.  
刘秉琦,周斌,张悦,等. 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.
- [7] LI Li, WANG Xing-bin, ZHANG Wei-guo. A recognition method of "cat-eye" effect target based on texture character [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 0210001.  
李丽,王兴宾,张卫国. 基于纹理特征的“猫眼”效应目标识别方法[J]. *光子学报*, 2014, **43**(2): 0210001.
- [8] LEI Peng, SUN Ke, ZHANG Yu-fa, *et al.* Cat's eye echo-wave characteristics of staring photoelectric imaging system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(6): 0614004.  
雷鹏,孙可,张玉发,等. 凝视光电成像系统猫眼回波特性的理论与实验研究[J]. *光子学报*, 2016, **45**(6): 0614004.
- [9] HUA Wen-shen, ZHANG Yue, WANG Yuan-bo, *et al.* Analysis of influence factors for anti-detection ability of cat-eye optical windows[J]. *Laser Technology*, 2013, **37**(3): 380-384.  
华文深,张悦,王元铂,等. 猫眼光学窗口反侦察能力影响因素分析[J]. *激光技术*, 2013, **37**(3): 380-384.
- [10] ZHANG Yue, HUA Wen-shen, ZHOU Bin, *et al.* Reflection properties of cat-eye optical system with misaligned reticles[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(8): 1816-1820.  
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): 1816-1820.
- [11] DONG Xiao-gang, ZHU Hai-jun, YIN Gang. Detection distance analysis of pulsed laser based on cat's eye effect[J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(1): 67-70.  
董小刚,朱海军,殷刚. 基于“猫眼效应”的激光主动侦查系统探测距离分析[J]. *激光与红外*, 2011, **41**(1): 67-70.
- [12] WU Dong-sheng, BAI Ting-zhu, LIU Bing-qi, *et al.* Detection range equation of cat-eye target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(9): 2574-2578.  
武东生,白廷柱,刘秉琦,等. “猫眼”目标探测距离方程[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(9): 2574-2578.
- [13] MA Yuan, JI Xiao-ling. Average intensity of tilted and off-axis Gaussian Schell-model beams propagating through a cat-eye optical lens in atmospheric[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(9): 094214.  
马媛,季小玲. 倾斜离轴高斯-谢尔模型光束在大气湍流中通过猫眼光学镜头反射光的光强特性[J]. *物理学报*, 2013, **62**



(9):094214.

- [14] GLARES-Gated laser retro-reflection scanner[EB/OL]. <http://www.valcartier.drdc-rddc.gc.ca/sciences/glares-eng.asp>,2010-03-05.
- [15] REN X M, LI L. Recognizing cat-eye targets with dual criterions of shape and modulation frequency[J].*Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(4): 38-41.
- [16] ZHAO Yan-zhong, SUN Hua-yan, ZHENG Yong-hui, *et al*. Theoretical analysis of scanning and identifying cat-eye target with coherently combined array Gaussian beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 102-108.  
赵延伸,孙华燕,郑勇辉,等. 相干合成线阵高斯光束扫描识别猫眼目标理论分析[J]. *光学学报*,2011,**31**(4):102-108.