

准平行光干涉的激光干扰方案与实验研究

陈 飞¹, 柴金华², 刘 欣³

- (1. 陆军军官学院 研究生管理大队, 安徽 合肥 230031;
2. 陆军军官学院 军用光电工程教研室, 安徽 合肥 230031;
3. 陆军军官学院 物理教研室, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 提出一种利用准平行光干涉进行激光干扰的方案。在干涉理论分析的基础上, 利用 He-Ne 激光实验得到 2 路、3 路、4 路的多光束准平行光干涉图像与干涉强度极大值, 并仿真得出准平行光干涉图像和干涉光强分布。实验和仿真表明: 准平行光干涉的图样的形状取决于光束的方向角。在某些方向角时, 干涉视场的中央可出现干涉亮纹或亮斑。干涉条纹或干涉光斑之间的间距由两两光束之间的夹角所确定。在不大于 0.5 mrad 范围内, 两两光束间夹角的实验数据与仿真数据近似一致, 并且干涉亮纹或亮斑的强度极大值接近理论最大值, 即 2 束、3 束、4 束准平行光的干涉强度最大值分别是单束光强的 4 倍、8 倍、15 倍。给出干扰方案的效果评估以及干扰有效性的验证。

关键词: 激光干扰; 准平行光; 干涉; 多光束

中图分类号: TN97 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0706001

Laser jamming scheme and experiment research of quasi parallel light interference

Chen Fei¹, Chai Jinhua², Liu Xin³

- (1. Graduate Management Brigade, Army Officer Academy, Hefei 230031, China;
2. Section of Military Optoelectronic Engineering, Army Officer Academy, Hefei 230031, China;
3. Section of Physics, Army Officer Academy, Hefei 230031, China)

Abstract: A scheme for laser jamming using quasi parallel light interference was proposed. On the basis of the interference theoretical analysis, the multi-beam quasi parallel light interference images and interference intensity maximum value of two beams, three beams and four beams were obtained by He-Ne laser, and the interference images and the light intensity distribution were got by simulation. Both theoretical and experimental results show that the patterns of quasi parallel light interference images depend on beam direction angle. In certain direction angle, there is bright stripes or bright spots of interference in the middle of the interference field. The distance between interference stripes or spots is decided by the angle between two beams of light. When the value of the angle between two beams is no more than 0.5 mrad, the experiment data is consistent with the simulation data, and the interference

收稿日期: 2016-11-10; 修订日期: 2016-12-20

作者简介: 陈飞(1992-), 男, 硕士生, 主要从事光电子技术应用方面的研究。Email: 2278849323@qq.com

导师简介: 柴金华(1964-), 男, 教授, 主要从事激光、光电对抗理论与技术方面的研究。Email: ch120918@sina.com

intensity maximum is close to the result of theoretical maximum, that is the light intensity maximum of two, three and four beams of quasi parallel light interference are four, eight, fifteen times the size of the light intensity of single beam. The effect evaluation and the test of validity of laser jamming scheme were given.

Key words: laser jamming; quasi parallel light; interference; multi-beam

0 引言

目前, 激光有源干扰技术的研究主要集中于激光欺骗式干扰和高重频激光干扰两大方面。激光欺骗式干扰是干扰半主动制导武器较为有效的方式, 主要有角度欺骗干扰和距离欺骗干扰。随着精确制导武器的快速发展, 欺骗式干扰的难度越来越大。高重频激光干扰是令重复频率高的激光进入导引信号的选通波门, 干扰导引头对于有效信息的获取。目前对高重频激光干扰的研究在干扰机理方面还不够透彻。在光电对抗的实际应用中, 需要发展一些新的激光干扰方法^[1]。文中提出基于准平行光干涉的激光干扰方案, 其基本思路是: 让多光束准平行光形成干涉, 使干涉亮斑干扰目标, 由于干涉亮斑功率密度比非相干情形大得多, 这样可以增强干扰效果。查阅相关文献尚未发现激光干涉用于激光干扰的研究, 文中给出理论分析和实验以及仿真。

关于激光有源干扰国内外学者进行了很多研究。Ric(H.)M.A.Schleijpen^[2]等人研究了中波红外激光对于焦平面阵列相机的致眩效应。Anschel Israel^[3]等人提出了基于光纤激光的激光干扰系统。Espen Lippert^[4]等人提出利用高能量的中红外激光干扰红外制导导弹的方法。陈玉丹^[5]等人进行了激光欺骗干扰中干扰参数的分析, 并分析了真、假目标与导引头之间的位置关系, 得出干扰信号时间的不确定性可以增强干扰效果。李慧^[6]等人对欺骗式干扰的机理分析的基础上, 提出利用仿真技术对干扰效果评估。以上研究侧重于理论计算和理想模型的建立^[7], 而对于欺骗干扰应用过程中的局限性没有给出解决方案。赵乾^[8]等人研究了高重频激光对不同编码体制的干扰效果, 同时比较了不同重频激光的干扰效果。朱陈成^[9]等人研究了高重频激光不同工作模式, 发现重频的不同造成了干扰模式的差异。党红恩^[10]等人进行了激光干扰成像制导导弹的研究, 得出激

光可以干扰成像制导导弹的结论。张强^[11]等人提出利用低重频激光和高重频激光合成复合型激光的方法, 这是一种非相干合成的方法, 得到的复合光束可以对不同类型目标进行干扰, 此方法虽然新颖, 但是文章只是从理论上论证其可行性, 并没有设计实验方法探究实际应用中的相关问题。以上是近年来较为典型的激光干扰方面的研究, 主要是在激光欺骗式干扰和高重频激光干扰的干扰效果方面的研究。

1 准平行光干涉的干扰方案

准平行光干扰方案如图 1 所示: 激光器发射出多个激光束, 光束之间有一定夹角, 但夹角很小, 即光束与光束之间是准平行的, 从而在远处仍然可以有较大重叠区域。正是在这重叠区域, 多个激光束相干叠加, 形成光强的干涉图样。由于理想情况下干涉极大的光强是单束光强的 N^2 倍, 所以将干涉极大光强部分作用于干扰目标, 例如制导武器的导引头, 将会产生更强的干扰效果。从干扰原理上看, 多光束的数目 N 越大, 干扰效果越强, 但实际上 N 越大时工程实现也更复杂。因此, 文中以两路、三路及四路光束为例进行准平行光干涉的实验与仿真。

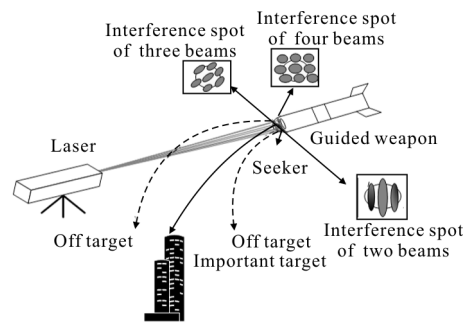


图 1 准平行光干涉的激光干扰方案示意图
Fig.1 Schematic diagram of quasi parallel light interference laser jamming scheme

激光干涉对干涉图样的要求是:(1)干涉视场有干涉极强的光斑;(2)干涉强度极大值尽量接近理论值,即单束光强的 N^2 倍。

2 准平行光干涉理论

2.1 波的叠加原理

考虑两列同频平面波,它们的振动方向一致,振幅分别是 A_1 和 A_2 ,均为常数,在空间任意点 P 的位相分布分别是 $\varphi_1(P)$ 和 $\varphi_2(P)$,它们的复振幅可表示为:

$$\begin{aligned} U_1(P) &= A_1 e^{i\varphi_1(P)} \\ U_2(P) &= A_2 e^{i\varphi_2(P)} \end{aligned} \quad (1)$$

将两者相加得到:

$$U(P) = U_1(P) + U_2(P) = A_1 e^{i\varphi_1(P)} + A_2 e^{i\varphi_2(P)} \quad (2)$$

而强度(平均能流密度)可以表示为复振幅与其共轭的乘积,即:

$$\begin{aligned} I(P) &= U(P)U^*(P) = \\ & [A_1 e^{i\varphi_1(P)} + A_2 e^{i\varphi_2(P)}] [A_1 e^{-i\varphi_1(P)} + A_2 e^{-i\varphi_2(P)}] = \\ & A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 [e^{i\varphi_1(P) - i\varphi_2(P)} + e^{i\varphi_2(P) - i\varphi_1(P)}] \end{aligned} \quad (3)$$

将欧拉公式 $\cos\alpha = \frac{e^{i\alpha} + e^{-i\alpha}}{2}$ 代入公式(3)可得:

$$\begin{aligned} I(P) &= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos[\varphi_1(P) - \varphi_2(P)] = \\ & A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos\delta(P) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\delta(P) = \varphi_2(P) - \varphi_1(P)$,表示两束光的相位差。 $2A_1 A_2 \cos\delta(P)$ 是干涉项,因而 $\delta(P)$ 是光强的影响因子,所以想得到稳定的干涉条纹 $\delta(P)$ 必须稳定。当 $\cos\delta(P) = 1$ 时, $I(P)$ 存在最大值 $I_{\text{Max}} = (A_1 + A_2)^2$; 而 $\cos\delta(P) = -1$ 时, $I(P)$ 存在最小值 $I_{\text{Min}} = (A_1 - A_2)^2$ 。

引入反衬度:

$$\eta = \frac{I_{\text{Max}} - I_{\text{Min}}}{I_{\text{Max}} + I_{\text{Min}}} = \frac{2A_1 A_2}{A_1^2 + A_2^2} \quad (5)$$

令 $I_0(P) = A_1^2 + A_2^2$, $I(P)$ 的表达式也可写为:

$$I(P) = I_0(P) [1 + \eta \cos\delta(P)] \quad (6)$$

2.2 两束准平行光干涉

如图 2 所示,假设两束同频平行光沿 z 轴传播,振幅相等均为 A , $z=0$ 处的相位分别是 φ_{10} 、 φ_{20} ,光束传播方向的方向角分别是 $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ 和 $(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$,其中 α 、 β 、 γ 分别是光线与 x 、 y 、 z 轴的方向角, k_1 、 k_2 为

波矢量大小。

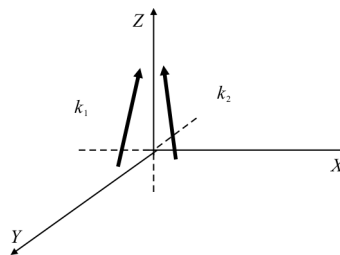


图 2 两束准平行光干涉示意图

Fig.2 Schematic diagram of two beams of quasi parallel light interference

那么两束光的相位分布可以表示为:

$$\begin{aligned} \varphi_1(x, y) &= k(\cos\alpha_1 x + \cos\beta_1 y + \cos\gamma_1 z) \varphi_{10} \\ \varphi_2(x, y) &= k(\cos\alpha_2 x + \cos\beta_2 y + \cos\gamma_2 z) \varphi_{20} \end{aligned} \quad (7)$$

将公式(7)代入公式(6),得到 $z=0$ 面的干涉光强公式:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= I_0 \{ 1 + \eta \cos[k(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)x + \\ & k(\cos\beta_1 - \cos\beta_2)y] + \varphi_{10} - \varphi_{20} \} \end{aligned} \quad (8)$$

由公式(8)可见,干涉条纹的取向和间距取决于 $\cos\alpha$ 和 $\cos\beta$ 以及初相位 φ_{10} 和 φ_{20} 。

为方便讨论光束入射情况,设光束与 x 、 y 轴的方向角 α_1 、 β_1 、 α_2 、 β_2 的余角为 α_{11} 、 β_{11} 、 α_{22} 、 β_{22} ,那么 $\alpha_1 = \pi/2 - \alpha_{11}$, $\beta_1 = \pi/2 - \beta_{11}$, $\alpha_2 = \pi/2 - \alpha_{22}$, $\beta_2 = \pi/2 - \beta_{22}$ 。则公式(8)可写为:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= I_0 \{ 1 + \eta \cos[k(\sin\alpha_{11} - \sin\alpha_{22})x + \\ & k(\sin\beta_{11} - \sin\beta_{22})y] + \varphi_{10} - \varphi_{20} \} \end{aligned} \quad (9)$$

2.3 三光束准平行光干涉

多束光干涉即为光束之间两两进行相干叠加。图 3 为三束准平行光干涉示意图,其中 k_1 、 k_2 、 k_3 分别表示三束光的波矢量大小。

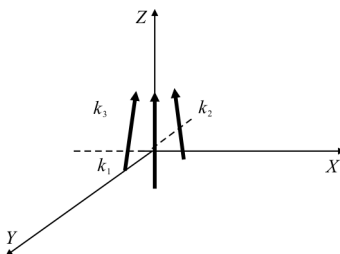


图 3 三束准平行光干涉示意图

Fig.3 Schematic diagram of three beams of quasi parallel light interference

设三束光的光强分别为 $I_1(P)$ 、 $I_2(P)$ 、 $I_3(P)$,两两光束间相位差为 $\delta_{12}(P) = \varphi_1(P) - \varphi_2(P)$, $\delta_{13}(P) = \varphi_1(P) -$

$\varphi_3(P), \delta_{23}(P)=\varphi_2(P)-\varphi_3(P)$, 则由叠加原理得三束平行光干涉强度的一般表达式为:

$$I(P)=I_1(P)+I_2(P)+I_3(P)+2\sqrt{I_1(P)I_2(P)}\cos\delta_{12}(P)+2\sqrt{I_1(P)I_3(P)}\cos\delta_{13}(P)+2\sqrt{I_2(P)I_3(P)}\cos\delta_{23}(P) \quad (10)$$

2.4 四光束准平行光干涉

四束准平行光干涉如图 4 所示, 其中 k_1, k_2, k_3, k_4 分别表示各光束的波矢量大小。

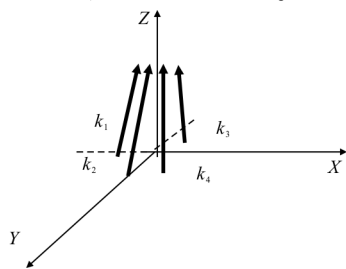


图 4 四束准平行光干涉示意图

Fig.4 Schematic diagram of four beams of quasi parallel light interference

同理也可得到四束平行光干涉强度的一般表达式:

$$I(P)=I_1(P)+I_2(P)+I_3(P)+I_4(P)+2\sqrt{I_1(P)I_2(P)}\cos\delta_{12}(P)+2\sqrt{I_1(P)I_3(P)}\cos\delta_{13}(P)+2\sqrt{I_1(P)I_4(P)}\cos\delta_{14}(P)+2\sqrt{I_2(P)I_3(P)}\cos\delta_{23}(P)+2\sqrt{I_2(P)I_4(P)}\cos\delta_{24}(P)+2\sqrt{I_3(P)I_4(P)}\cos\delta_{34}(P) \quad (11)$$

2.5 多光束准平行光干涉

同理, 设有 N 束准平行光形成干涉, 强度表达式为:

$$I(P)=\sum_{n=1}^N I_n(P)+2\sum_{n=1}^{N-1}\sum_{n<r}^N \sqrt{I_n(P)I_r(P)}\cos\delta_{nr}(P) \quad (12)$$

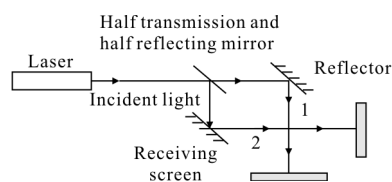
如果每束光强度均相等且为 $I(P)$, 当 $\cos\delta_{nr}(P)$ 均为 1 时, 有最大值 $I_n(P)_{\text{Max}}=N^2I(P)$ 。

3 准平行光干涉实验装置与实验方法

3.1 实验装置

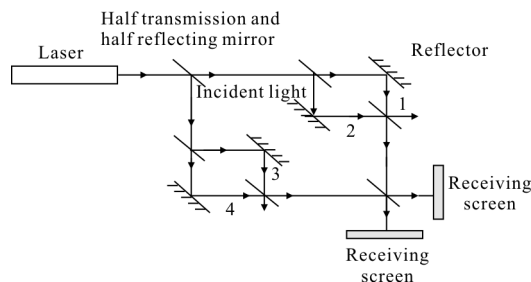
准平行光干涉装置的光路图如图 5 所示。图 5(a)

中, He-Ne 激光束首先经半反半透镜分成两路, 其一经反射镜反射成第一束光, 其二也经反射镜反射成第二束光, 第一束光和第二束光经一半反半透镜后形成第一束和第二束之间的干涉; 图 5(b) 中 He-Ne 激光束经半反半透镜分成两路后, 每一路再经半反半透镜分光, 经反射镜形成第一束光和第二束光之间的干涉以及第三束和第四束光之间的干涉, 它们再由一个半反半透镜形成一、二、三、四之间的干涉, 任意遮住一束光形成三束光之间的干涉。从接收屏上观察干涉条纹。



(a) 两束准平行光干涉光路图

(a) Light path diagram of two beams of quasi parallel light interference



(b) 三束、四束准平行光干涉光路图

(b) Light path diagram of three beams and four beams of quasi parallel light interference

图 5 准平行光干涉实验光路图

Fig.5 Light path diagram of quasi parallel light interference experiment

实验装置实物图如图 6 所示。

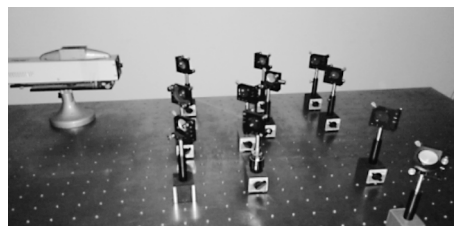


图 6 准平行光干涉实验装置实物图

Fig.6 Experiment device diagram of quasi parallel light interference

3.2 实验方法

(1) 接通 He-Ne 激光器电源, 调节激光器的俯仰装置使激光束的方向与光学平台平行。

(2) 沿着激光束传播的方向首先放置一半反半透镜, 调节镜片固定架的高低和方向旋钮, 从而调整激光方向角。保证透射光平行于光学平台, 反射光垂直于透射光方向。

(3) 分别在透射方向和反射方向上放置反射镜, 仔细调节各镜片架的高低及方向旋钮, 实现两束光干涉。

(4) 进行四束光干涉时, 在按照步骤(3)再放置半反半透镜和反射镜, 仔细调节各旋钮实现四束光干涉。

(5) 进行三束光干涉时, 在四束光干涉实验的基础上, 将图 5(b)中所示第一、二、三、四束光中任一束光遮挡住, 即可实现三束光的干涉。

(6) 在半反半透镜输出光路上放置接收屏就可以观察二、三、四束干涉图像。

实验中特别注意以下几点:

(1) 由于两两光之间角度要求很小, 通过反复调节各半反半透镜及各反射镜的高低和方向旋钮, 才可能得到干涉条纹。

(2) 激光通过半反半透镜时, 均要检查光束传播方向是否偏移。

(3) 严格半反半透镜和反射镜的摆放位置, 摆放时用直尺等测量工具测量位置, 使得光束之间的光程差尽量小。

(4) 接收屏放在较远位置, 以便更清晰看到干涉条纹。实验中通过反射镜, 将接收屏放于离最后半反半透镜处 7 m 远的位置。

4 实验结果与仿真结果

4.1 两束准平行光干涉的图样

理想情况下两光束干涉时两束光的振幅 A_1 和 A_2 相等。实验中, 光束经过分光反射镜组后光强并不能够保证完全相等。按照上述实验方法, 调节光束方向角, 实验中各光束之间的夹角很小, 在零点几毫弧度范围内调节。

光束之间角度测量方法是在接收屏上分别描绘出两光束对应的光斑的轮廓, 测量光斑上下边缘距离 Δx 和左右边缘距离 Δy , 假设干涉光束到达接收屏的光程为 L , 利用公式 $\Delta\alpha = \Delta x/L$, $\Delta\beta = \Delta y/L$, 就可得出两

光束在两个垂直方向上的夹角。实验中 L 为 7 m, 不同的入射角度得到的典型干涉图像如图 7 所示。

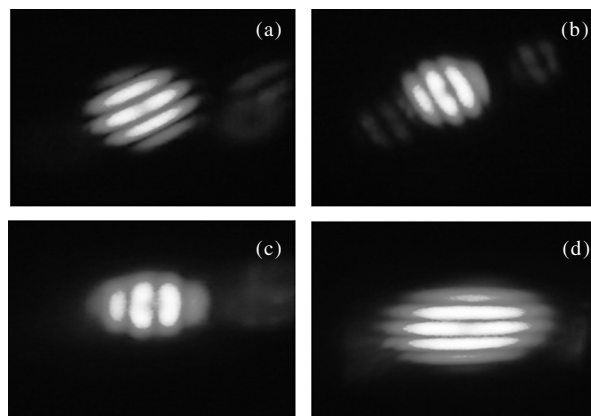
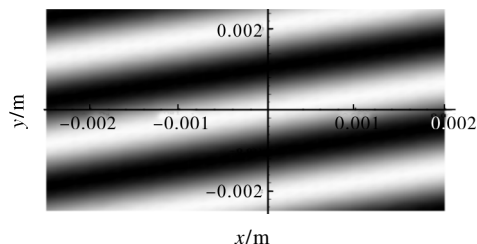


图 7 两束准平行光干涉的典型图样

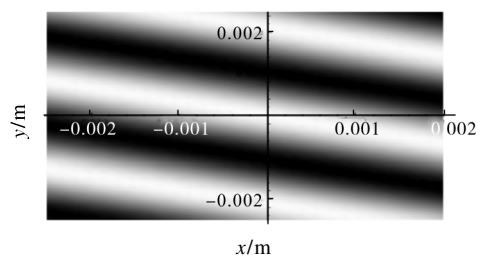
Fig.7 Typical patterns of two beams of quasi-parallel light interference

针对图 7(d)情形, 分别测量不同典型干涉图像光斑上下边缘和左右边缘之间的距离差, 多次测量取平均值。算出上下方向夹角 $\Delta\alpha_{12} \approx 0$, 左右方向夹角 $\Delta\beta_{12} \approx 0.49$ mrad。

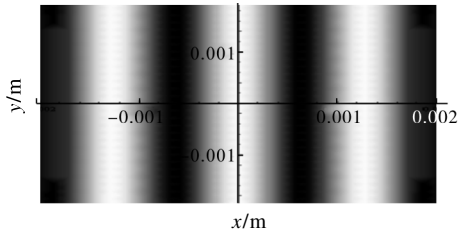
用 Mathematica 对两光束干涉情况进行模拟, 假设 $z=0$, 即接收屏位于 $z=0$ 平面, 因而只需研究 α_{mn} 和 β_{mn} ($n=1,2$) 对图像的影响。已知激光波长 $\lambda=632.8$ nm, 另设 $A_1/A_2=1$, 即认为两束光振幅相同, 这与实际情况接近。 $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$, 即两束光的初相相等, 这与实验中两束光来自同一光源情形相符。对应不同的 α_{11} 、 α_{22} 、 β_{11} 、 β_{22} 值的典型图像如图 8 所示。



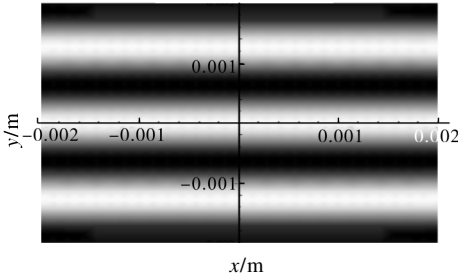
(a) $\alpha_{11}=0.1$ mrad, $\alpha_{22}=0$, $\beta_{11}=-0.3$ mrad, $\beta_{22}=0$



(b) $\alpha_{11}=0.1$ mrad, $\alpha_{22}=0$, $\beta_{11}=0.3$ mrad, $\beta_{22}=0$



(c) $\alpha_{11}=0.6$ mrad, $\alpha_{22}=0.1$ mrad, $\beta_{11}=0$, $\beta_{22}=0$



(d) $\alpha_{11}=0$, $\alpha_{22}=0$, $\beta_{11}=0.6$ mrad, $\beta_{22}=0.1$ mrad

图 8 两束准平行光干涉的仿真图像

Fig.8 Simulation images of two beams of quasi parallel light interference

图 8 表明,仿真的干涉图样与实验结果相一致,图 8(d)情形下,实验所测的两束光夹角值 $\alpha_{12} \approx 0$, $\beta_{12} \approx 0.49$ mrad 与仿真实验得到的数据 $\alpha_{12} = \alpha_{11} - \alpha_{22} = 0$, $\beta_{12} = \beta_{11} - \beta_{22} = 0.5$ mrad 相符合。

由仿真结果可知,对于所取的一些典型角度,中央是亮条纹,改变 α_{nn} 和 β_{nn} 会改变干涉条纹的取向和间隔。

针对图 8(d)情形, $\alpha_{11}=0$, $\alpha_{22}=0$, 条纹是平行于 x 轴的,其条纹间距,即为两相邻干涉极大对应的间距。根据公式(9),当相位 $k(\sin\beta_{11} - \sin\beta_{22})y$ 为 2π 的整数倍时,对应干涉主极大,于是容易得到条纹间距:

$$d = \frac{\lambda}{\sin\beta_{11} - \sin\beta_{22}} \approx \frac{\lambda}{\beta_{11} - \beta_{22}} \quad (13)$$

将图 8(d)的数据 $\beta_{11}=0.6$ mrad, $\beta_{22}=0.1$ mrad 代入计算得理论值 $d \approx 0.00127$ m,从图 8(d)看出条纹间距值为 0.0013 m,此数值与理论值相近。

当 x 轴与两光束所在的平面垂直时得到平行于 x 轴的条纹;当 y 轴与两光束所在平面垂直时得到平行于 y 轴的条纹。其他情况为斜条纹。

4.2 三束准平行光干涉的图样

按照上述实验方法分别遮挡四束光中的一束,实验得到三束准平行光干涉的典型图样如图 9 所示。

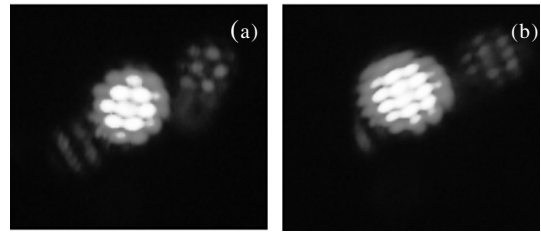


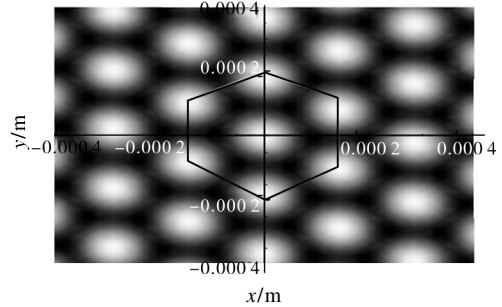
图 9 三束准平行光干涉的典型图样

Fig.9 Typical patterns of three beams of quasi parallel light interference

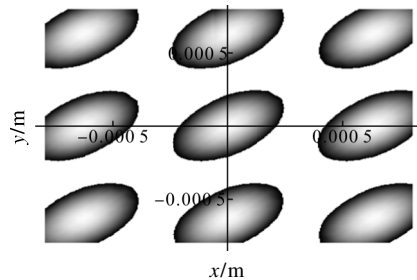
针对图 9(a)情形,按照上述方法分别测量光斑上下边缘和左右边缘之间的距离差,多次测量取平均值。

用平均值算得两两光束间的夹角得 $\Delta\alpha_{12}=0.42$ mrad, $\Delta\alpha_{13}=0.22$ mrad, $\Delta\beta_1=0.23$ mrad, $\Delta\alpha_{23}=0.23$ mrad, $\Delta\beta_{23}=0.21$ mrad, $\Delta\beta_{12} \approx 0$ 。

进行仿真,已知激光波长 $\lambda=632.8$ nm,设 $A_1:A_2:A_3=1$, $\varphi_1-\varphi_2=0$, $\varphi_2-\varphi_3=0$, 对应不同光束方向角的典型仿真图像如图 10 所示。



(a) $\alpha_{11}=0.2$ mrad, $\alpha_{22}=-0.2$ mrad, $\alpha_{33}=0$
 $\beta_{11}=0.2$ mrad, $\beta_{22}=0.2$ mrad, $\beta_{33}=0$



(b) $\alpha_{11}=0.2$ mrad, $\alpha_{22}=0.2$ mrad, $\alpha_{33}=0$
 $\beta_{11}=0.2$ mrad, $\beta_{22}=0$, $\beta_{33}=0.2$ mrad

图 10 三束准平行光干涉的仿真图像

Fig.10 Simulation images of three beams of quasi parallel light interference

两两光束间夹角的实验值与仿真值对比,如表 1 所示。

表1 三束准平行光干涉时两两光束夹角的实验值与仿真值对比(单位:mrad)

Tab.1 Contrast of the angle between two beams of experiment data and simulation data when three beams of quasi parallel light interference (Unit:mrad)

Angle/mrad	Simulation value	Experiment value
$\Delta\alpha_{12}$	0.4	0.42
$\Delta\alpha_{13}$	0.2	0.22
$\Delta\alpha_{23}$	0.2	0.23
$\Delta\beta_{12}$	0	0.00
$\Delta\beta_{13}$	0.2	0.23
$\Delta\beta_{23}$	0.2	0.21

比较图 10(a)情形的实验和仿真结果得到的数据近似一致。

仿真图样与实验图样一致的特征是:呈现六边形分布的周期性光斑,并在中间形成亮纹。入射角度变化时,光斑变形,周期发生变化。

4.3 四束准平行光干涉的图样

四束准平行光干涉实验要求更高,实验所得的典型干涉图样如图 11所示。

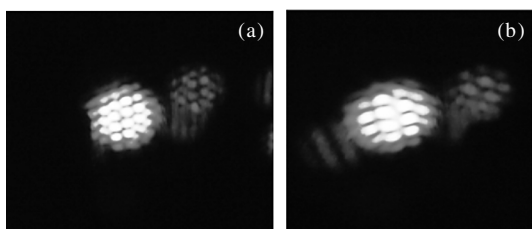


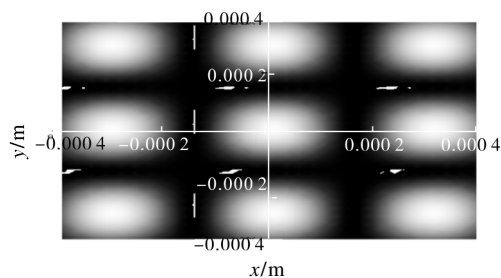
图 11 四束准平行光干涉的典型图样

Fig.11 Typical patterns of four beams of quasi parallel light interference

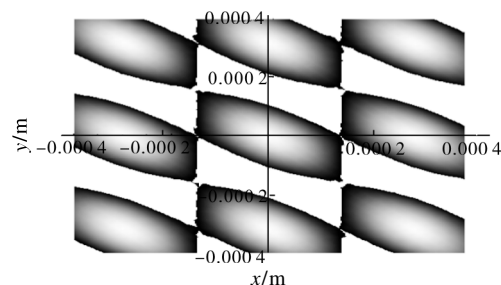
针对图 11(a)情形分别测量四束光束之间上下和左右边缘的距离差,多次测量取平均值。

由平均值算得: $\Delta\beta_{12}=0.22$ mrad, $\Delta\alpha_{13}=0.20$ mrad, $\Delta\alpha_{14}=0.21$ mrad, $\Delta\beta_{14}=0.21$ mrad, $\Delta\alpha_{23}=0.19$ mrad, $\Delta\beta_{23}=0.21$ mrad, $\Delta\alpha_{24}=0.19$ mrad, $\Delta\beta_{34}=0.22$ mrad,而 $\Delta\alpha_{12}$ 、 $\Delta\beta_{13}$ 、 $\Delta\beta_{24}$ 和 $\Delta\alpha_{34}$ 可近似为 0。

仿真图像如图 12所示。



(a) $\alpha_{11}=0.2$ mrad, $\alpha_{22}=0.2$ mrad, $\alpha_{33}=0$, $\alpha_{44}=0$
 $\beta_{11}=0.2$ mrad, $\beta_{22}=0$, $\beta_{33}=0.2$ mrad, $\beta_{44}=0$



(b) $\alpha_{11}=0.2$ mrad, $\alpha_{22}=0.2$ mrad, $\alpha_{33}=0.2$ mrad, $\alpha_{44}=-0.2$ mrad
 $\beta_{11}=0.2$ mrad, $\beta_{22}=-0.2$ mrad, $\beta_{33}=0.2$ mrad, $\beta_{44}=-0.2$ mrad

图 12 四束准平行光干涉的仿真图像

Fig.12 Simulation images of four beams of quasi parallel light interference

两两光束间夹角的实验值与仿真值对比如表 2 所示。

表2 四束准平行光干涉两两光束夹角的实验值与仿真值对比(单位:mrad)

Tab.2 Contrast of the angle between two beams of experiment data and simulation data when four beams of quasi parallel light interference (Unit:mrad)

Angle/mrad	Simulation value	Experiment value
$\Delta\alpha_{12}$	0	0.00
$\Delta\alpha_{13}$	0.2	0.20
$\Delta\alpha_{14}$	0.2	0.21
$\Delta\alpha_{23}$	0.2	0.19
$\Delta\alpha_{24}$	0.2	0.19
$\Delta\alpha_{34}$	0	0.00
$\Delta\beta_{12}$	0.2	0.22
$\Delta\beta_{13}$	0	0.00
$\Delta\beta_{14}$	0.2	0.21
$\Delta\beta_{23}$	0.2	0.21
$\Delta\beta_{24}$	0	0.00
$\Delta\beta_{25}$	0.2	0.22

比较发现图 12 (a)情形实验数据与仿真结果近似一致。

仿真图像与实验图像一致的特征是：四光束干涉会形成均匀的呈现近似正方形分布的周期性光斑，在中间形成亮纹。改变光束方向角干涉图像会发生变化。

4.4 准平行光干涉的强度实验与仿真

针对两光束图 7(d)、三光束图 9(a)和四光束图 11(a)情形,利用光阑选择干涉极强点,光阑孔径为 4 mm,面积为 $4\pi\text{mm}^2$,光斑其余位置被遮挡,利用激光功率仪分别测得两束、三束、四束准平行光干涉光强极大值如表 3 所示。

表 3 多束准平行光干涉光强的极大值
(单位: $\text{W}/(4\pi\text{mm}^2)$)

Tab.3 Interference intensity maximum value of multi beams of quasi parallel light interference (Unit: $\text{W}/(4\pi\text{mm}^2)$)

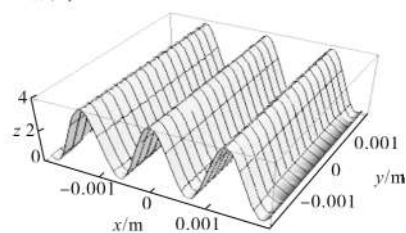
	Average light intensity of single light	Average light intensity of incoherent light	Maximum light intensity of coherent light
Two beams	0.6	1.2	2.27
Three beams	0.56	1.68	4.45
Four beams	0.58	2.32	6.21

理论上两束、三束和四束准平行光干涉的最大光强应为单光束光强的 4 倍、9 倍和 16 倍,应为 2.4 W、5.04 W 和 9.28 W,而实验值 2.27 W、4.45 W 和 6.21 W,比理论值偏低。

原因在于：理论值是基于多光束之间的初相差为零,而实验中并不是这样的,实验中的初相差是由各光束之间的光程差决定的。分别进行光束光程的测量测得光束一、二、三、四的光程分别为 99.5、98.8、104.4、101.7 cm。由相位差 $\Delta\varphi$ 与光程差 Δl 之间的关系 $\Delta\varphi=(2\pi/\lambda)\Delta l$ 可以计算出第一、二束,第一、三束,第一、四束,第二、三束,第二、四束,第三、四束之间的相位差分别为 0.262π 、 1.83π 、 0.79π 、 0.097π 、 0.23π 和 1.87π ,再由公式(8)~(11)得到理论修正值分别为 2.28、4.47、6.23 μW ,可以看出,经过修正后,实验值与理论值很接近。

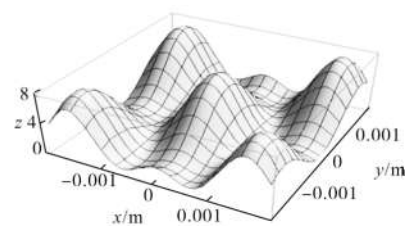
用 Mathematica 对两束、三束、四束准平行光在典型的方向角下的干涉强度图像进行三维仿真,结

果如图 13 所示。



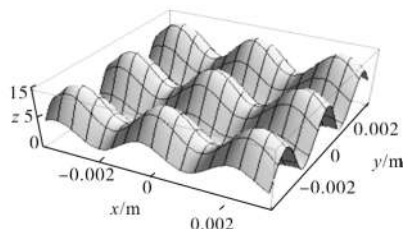
($\alpha_{11}=0, \alpha_{22}=0, \beta_{11}=0.6\text{ mrad}, \beta_{22}=0.1\text{ mrad}$)
(a) 两束准平行光干涉强度的仿真图像

(a) Simulation image of two beams of quasi parallel light interference intensity



($\alpha_{11}=0.2\text{ mrad}, \alpha_{22}=-0.2\text{ mrad}, \alpha_{33}=0;$
 $\beta_{11}=0.2\text{ mrad}, \beta_{22}=0.2\text{ mrad}, \beta_{33}=0$)
(b) 三束准平行光干涉强度的仿真图像

(b) Simulation image of three beams of quasi parallel light interference intensity



($\alpha_{11}=0.2\text{ mrad}, \alpha_{22}=0.2\text{ mrad}, \alpha_{33}=0, \alpha_{44}=0;$
 $\beta_{11}=0.2\text{ mrad}, \beta_{22}=0, \beta_{33}=0.2\text{ mrad}, \beta_{44}=0$)
(c) 四束准平行光干涉强度的仿真图像

(c) Simulation image of four beams of quasi parallel light interference intensity

图 13 准平行光干涉光强分布图

Fig.13 Intensity distribution diagrams of quasi parallel light interference

根据仿真结果可知：在典型方向角下,干涉强度分布特征如下。

- (1) 两束准平行光干涉时最大强度是单束光的 4 倍,最小值为 0;
- (2) 三束准平行光干涉时最大强度是单束光的 8 倍,最小值为 0;
- (3) 四束准平行光干涉时最大强度是单束光的

15 倍,最小值为 0。

理论预测是,当光束之间的方位角之差近似为 0 时,干涉最大强度分别为单束光强的 4 倍、9 倍和 16 倍。可见在典型角度下,最大强度值接近理论值。

5 干扰方案的效果评估

干扰成功率是光电对抗效果评估中普遍应用的一个重要指标,定义为干扰设备在规定条件下有效干扰的次数与实施干扰的总次数之比。干扰成功率越高,则说明干扰设备对制导武器的干扰效果越好。同一信号源的多束激光干涉后光强成倍增加,在一定情况下能够提高干扰成功率,但对激光导引头的干扰效果(欺骗、阻塞、饱和、损伤等),单一增加脉冲能量并不一定就干扰有效,需要从导引头使用的探测器以及接收信号的时序、频域、能量域和空间域特征来综合分析。

对于文中方案的评估有意义的是在干扰成功率不变的情况下增加干扰作用距离^[12]。设干扰激光波长为 $1.06 \mu\text{m}$,激光能量为 E ,大气衰减系数为 μ ,光束的发散角为 θ ,对于波长 $1.06 \mu\text{m}$,有经验公式 $\mu=2.7/V$,这里 V 为能见度,激光干扰时距离为 R ,受干扰的导引头的受光面积为 A ,导引头受干扰的能量阈值为 E_t ,那么可有:

$$E_t = \frac{A}{\pi(R\theta)^2} E e^{-\mu R} \quad (14)$$

多光束的准平行光是利用到达导引头受光面的干涉极强光斑实施干扰的。相对于单束干扰激光干扰情形,两束、三束和四束准平行光干扰的能量提高到 2 倍、3 倍和 4 倍,也就是单束分束后的每束光能量的 4 倍、9 倍和 16 倍。根据上述公式,相应的干扰距离要提高。假定在能见度 $V=10 \text{ km}$ 时,单束激光干扰时作用距离为 5 km ,根据公式(14)得到以下数据(见表 4)。

表 4 单束、两束、三束和四束准平行光的作用距离比较($V=10 \text{ km}$)

Tab.4 Contrast of jamming distance of one,two,three and four beams of quasi parallel light($V=10 \text{ km}$)

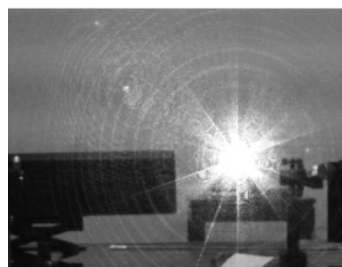
	Single beam	Two beams	Three beams	Four beams
Jamming distance/km	5	6.1	6.8	7.3

这个典型的例子说明,多光束准平行光干涉可以有效提高干扰距离。

6 干扰有效性实验

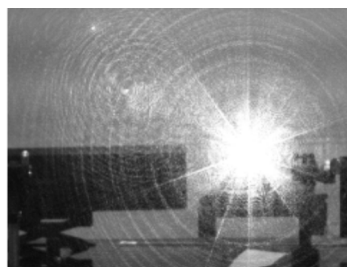
为验证多束准平行光干涉的干扰有效性^[13-14],利用 He-Ne 激光器模拟干扰源,CCD 相机模拟电视制导导引头的成像,进行模拟实验。实验时,利用光阑选择的干涉极强点,将其他光斑位置遮挡,将干涉极强点照射 CCD 相机;作为对比也进行非相干光束干扰实验,调节光束使得非相干光束通过光阑,射入 CCD 相机,CCD 相机与干涉装置的出射端相距 7 m 。干涉效果如图 14 所示。

由图 14 可见,四束相干情况下的干扰效果最好,相同光束情况下相干光束的干扰效果要强于非相干的干扰效果。



(a) 两束非相干

(a) Two beams of incoherent light



(b) 两束相干

(b) Two beams of coherent light



(c) 三束非相干

(c) Three beams of incoherent light



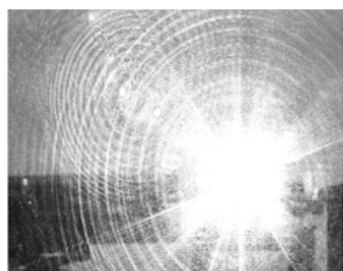
(d) 三束相干

(d) Three beams of coherent light



(e) 四束非相干

(e) Four beams of incoherent light



(f) 四束相干

(f) Four beams of coherent light

图 14 多束准平行光干涉的干扰效果图

Fig.14 Jamming effect images of multi-beam of quasi parallel light

7 结 论

提出了准平行光干涉进行激光干扰的方案,基于此方案进行了准平行光干涉的实验研究,实验给出的干涉图样与仿真所得的干涉图样相吻合,实验所得的两两光束间的夹角与仿真数值吻合,仿真干涉条纹间隔与理论值相吻合,说明了仿真与实验的一致性。实验给出了干涉光强极大值,与理论修正值相一致。仿真给出的干涉强度分布表明,最大干涉强度值与干涉光强理论极大值接近,另外干涉图样的中心为亮纹(或者亮斑),这样的干涉图样满足激光干扰所提出的要求。干扰方案的效果评估表明,在干扰成功率不变的情况下,该方案能增加干扰作用距

离。干扰的有效性实验表明,相比非相干情形,干扰效果是明显有效的。

平行光干涉可用于光刻,参考文献[15]对此作了研究。对比一下,平行光干涉在激光干扰和光刻上的应用,两者在干涉原理上是相同的。所不同的是,前者利用的是远场干涉强度分布,而后者利用的是近场干涉强度分布,前者平行光之间的夹角很小是准平行光干涉,而后者平行光之间夹角较大为平行光干涉。所以文中强调了“准平行光干涉”。虽然在理论上两者都是可行的,但是在未来工程化的过程中,还有许多技术难点需要解决。相比之下,由于激光干扰应用对激光能量和相干性要求都很高,并且光束受大气影响,所以技术难度更大。

文中从实验上证实了通过准平行光之间的方向角的调节可以得到所需干涉光斑。文中虽然只做了两束、三束和四束准平行光干涉实验,而对于更多光束实验,比如八束准平行光干涉实验,由于需要更加精密的角度调整,而实验室的调整架精度尚不能满足要求,故更多路准平行光干涉实验将留在以后进行。已采用的实验方法将对以后的进一步研究,以及对多束准平行干涉在激光对抗的实际应用具有参考价值。

参考文献:

- [1] Fan Jinxiang, Li Liang, Li Wenjun. Development of direct infrared countermeasure system and technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 789-794. (in Chinese) 范晋祥, 李亮, 李文军. 定向红外对抗系统与技术发展[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3):789-794.
- [2] Schleijsen R M A, van Heuvel J C, Mieremet A L. Laser dazzling of focal plane array cameras [C]//SPIE, 2007, 67380O-1-10.
- [3] Israel A, Vladimir K, Andrew L, et al. Fiber laser based jamming system:EP, 1629299[P]. 2010-11-10.
- [4] Espen Lippert, Magnus W Haakestad, Helge Fonnum. High-energy mid-IR laser for defence against heat-seeking missiles [C]//SPIE, 2014, DOI: 10.1117/2.1201408.005572.
- [5] Chen Yudan, Ying Jiaju, Li Li, et al. Study on key factors of laser cheat jamming [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014, 35(4): 729-732. (in Chinese) 陈玉丹, 应家驹, 李莉, 等. 激光欺骗干扰中关键参数的分析[J]. 半导体光电, 2014, 35(4): 729-732.
- [6] Li Hui, Li Yan, Liu Bingfeng, et al. Status development and key technique analysis of laser jamming technology[J]. *Laser*

- and Optoelectronics Progress*, 2011, 48 (8): 1–6. (in Chinese)
- 李慧, 李岩, 刘冰峰, 等. 激光干扰技术现状与发展及关键技术分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 1–6.
- [7] Yu Guoquan, Guo Jin, Li Yan, et al. Precision analysis of indoor simulation system for laser angle deception jam [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21 (10): 2610–2615. (in Chinese)
- 于国权, 郭劲, 李岩, 等. 激光角度欺骗干扰内场仿真系统精度分析[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(10): 2610–2615.
- [8] Zhao Qian, Liu Zhiguo, Wang Shicheng, et al. Research on the effect of high-repetition-frequency laser jamming on different coding systems [J]. *Laser and Infrared*, 2014, 44 (4): 414–418. (in Chinese)
- 赵乾, 刘志国, 王仕成, 等. 高重复频率激光对不同编码体制的干扰效果的研究[J]. 激光与红外, 2014, 44(4): 414–418.
- [9] Dang Hong'en, Li Hao, Zhao Erping, et al. Research on laser jamming to imagine guided missiles [J]. *Electronics Optics and Control*, 2016, 23(3): 41–44. (in Chinese)
- 党红恩, 李浩, 赵尔平, 等. 激光干扰成像制导弹研究[J]. 电光与控制, 2016, 23(3): 41–44.
- [10] Zhu Chencheng, Nie Jinsong, Tong Zhongcheng. Analysis on the mode of high repetition laser jamming [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 1060–1063. (in Chinese)
- 朱陈成, 聂劲松, 童忠诚. 高重复频率激光干扰模式的分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 1060–1063.
- [11] Zhang Qiang, Wang Yuefeng, Lei Chengqiang, et al. Research on beam coupling precision of double beams combination system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1055–1059. (in Chinese)
- 张强, 汪岳峰, 雷呈强, 等. 双光路合成系统光束耦合精度研究[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1055–1059.
- [12] Chen Zhaobing, Cao Lihua, Wang Bing, et al. Outfield experiment research of mid-wave infrared detecting system by long distance mid-infrared laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1700–1705. (in Chinese)
- 陈兆兵, 曹立华, 王兵, 等. 中波红外激光器远距离干扰红外探测器的外场实验研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42 (7): 1700–1705.
- [13] Wang Ming, Wang Tingfeng, Shao Junfeng. Analysis of femtosecond laser induced damage to array CCD camera[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 96–101. (in Chinese)
- 王明, 王挺峰, 邵俊峰. 面阵 CCD 相机的飞秒激光损伤分析[J]. 中国光学, 2013, 6(1): 96–101.
- [14] Qian Fang, Sun Tao, Shi Ningning, et al. Assessment of laser-dazzling effects based on laser spot and target features [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22 (7): 1896–1903. (in Chinese)
- 钱方, 孙涛, 石宁宁, 等. 结合光斑与目标特性的激光干扰效果评估[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(7): 1896–1903.
- [15] Ma Lina, Zhang Jin, Jiang Shilei, et al. Influence on patterns quality of multi-beam interference lithography caused by the deviation of incidence azimuth angle and intensity of light [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(10): 1–7. (in Chinese)
- 马丽娜, 张锦, 蒋世磊, 等. 入射光束角度及强度偏差对多光束干涉光刻的影响[J]. 光子学报, 2015, 44(10): 1–7.