

doi:10.3788/gzxb20184710.1014004

多子光束干涉时空域融合制导技术

吴梦瑶¹, 王石语¹, 屈鹏飞², 过振¹, 蔡德芳¹, 李兵斌¹

(1 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

(2 西安机电信息技术研究所 第二研发部, 西安 710065)

摘 要:提出一种基于多子光束干涉的时空域水印融合制导系统,将空域“水印密钥”干涉编码与传统时空域编码相结合,形成时空域相融合的水印编码信号;设计一种多子光束相干发射系统,将来自于同一激光器的激光光束等功率的分为 N 个子光束,子光束在空域内形成编码可控的水印干涉图样.结果表明,干涉图样具有特定的明暗相间识别特性,时空域融合编码信号具有作用距离远,抗干扰性强的突出优势.在多子光束相干发射系统中,当分束镜的位置偏移小于 0.1λ (λ 为激光波长),角度偏离小于 $0.1 \theta_0$ (θ_0 为光束发散角)时,发射系统机械振动对水印制导系统的影响可忽略不计.

关键词:末制导;半主动寻的;多子光束干涉;干涉编码;稳定性

中图分类号:TN248.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)10-1014004-9

Study on Temporal-spatial Fusion Guidance Based on Laser Multiple Sub-beams Interference

WU Meng-yao¹, WANG Shi-yu¹, QU Peng-fei², GUO Zhen¹, CAI De-fang¹, LI Bing-bin¹

(1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 Second Research and Development Department, Xi'an Institute of Electro-Mechanical Information Technology Research, Xi'an 710065, China)

Abstract: A temporal-spatial fusion guidance system based on multiple sub-beam interference is proposed. The spatial watermark pattern is combined with the temporal coded signal to produce a new temporal-spatial watermark coded signal. In the multiple sub-beam interference emission system, the laser is divided into several equal power sub-beams which can produce an effective spatial watermarking interference pattern due to their coherence. Calculation results show that the interference pattern appear special distribution features of alternating brightness and darkness. The operating range and the identification of the guidance system are improved by the watermark encoding mode. When the position offset and angle deviation of the beam splitter, which used in multiple sub-beams coherent emission system, are less than 0.1λ (λ is the wavelength) and $0.1 \theta_0$ (θ_0 is the beam divergence), respectively, the effect of mechanical vibration on the emission system can be ignored.

Key words: Terminal guidance; Semi-active homing; Multi-beam interference; Interference encoded; Stability

OCIS Codes: 140.3295; 100.4999; 260.3160; 220.4830; 040.1880

0 引言

激光半主动寻的制导武器具有打击精度高、军事用途广、结构简捷、成本低等优点,在现代武器装备中占据着不可替代的重要地位^[1-3].半主动寻的制导系统由编码可控的激光目标指示器以及弹上激光导引头组成,激光目标指示器将带有编码特性的激光束照射到目标表面处,激光导引头对接收到的激光信号进行解码

基金项目:国家预研究基金(No.9140A020105)资助

第一作者:吴梦瑶(1992-),女,博士研究生,主要研究方向为新型光电子器件. Email: 15094015115@163.com

导师(通讯作者):王石语(1966-),男,教授,博士,主要研究方向为新型光电子器件. Email: yshi@mail.xidian.edu.cn

收稿日期:2018-01-26;录用日期:2018-06-27

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

识别,进而对目标实施打击.由此可见,激光编码的产生方式是激光制导技术的关键.

现有的激光编码方式主要有^[4-6]:周期型编码、等差型编码、伪随机编码、以及脉宽编码等.这些编码方式的共同点是编码具有规律性,敌方可利用激光诱骗干扰系统对采用上述编码方式的半主动制导武器进行干扰,该诱骗干扰系统能够在短时间内对激光编码信号进行识别复制,进而由干扰机超前发射具有相同编码方式的激光信号到假目标上,致使制导武器失效,降低半主动制导武器的打击效果.

考虑到现有激光半主动寻的制导武器存在的弊端,本文提出一种基于多子光束干涉理论的时空域水印融合激光制导技术,通过多子光束相干原理分析得到最优化激光空间水印分布方式及激光导引头中探测器的工作方式,讨论了分束镜固有抖动对激光水印效果的影响,得到了在可识别条件下分束镜的抖动控制精度.该技术利用子光束的空间干涉效应使激光光斑在空域内具有特定的空间分布,使制导信号在已有时域编码基础上增加一层空域“水印密钥”,激光导引头可根据这一“水印密钥”对回波信号进行“敌我”识别,“水印密钥”指的是隐藏在空间图形中的可以按照一定算法提取的空间结构数据.采用多子光束干涉的优势在于,多子光束来源于同一激光光源,具有良好的空间相干性;相干光束的光束质量好,能量损失少.

1 系统框架与水印融合模型

1.1 系统框架

时空域融合制导系统要求激光目标指示器发出带有空域水印图样的时序编码信号,该编码信号中空域图样由子光束发射系统生成,经扩束系统后引入时域编码信号,形成时空域“水印密钥”相融合的制导信号;要求激光导引头中具有离轴能力的成像探测器,可以依照控制系统预先设定的时空域“水印密钥”解码信息,对回波信号进行快速准确的识别.系统设计框架如图1.

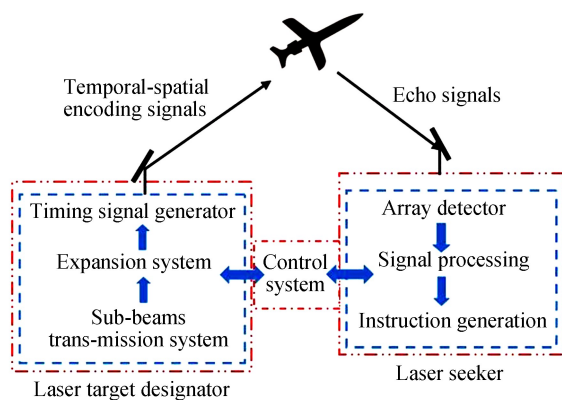


图1 时空域水印融合制导系统

Fig.1 Temporal-spatial watermark fusion guidance system

激光目标指示器中子光源分布的多样性决定空域水印图样的多样性,扩束系统用于调整空域水印图样尺寸.激光导引头并非采用传统半主动寻的所使用的四象限探测器^[7-9],而是采用具有离轴能力的激光成像式探测器,成像后干涉图样在导引头上的尺寸仅为毫米量级.要求成像探测器可以依照预先设定的干涉解码特性对回波信号进行快速准确的识别.需要强调的是由于在半主动寻的制导系统中,制导目标多为固定目标,当激光目标指示器位置固定时,其与制导目标之间的距离固定,由此保证子光束发射系统在目标处生成的干涉图样稳定不变.图2是光学制导武器在末制导阶段的进程示意图.在融合制导阶段(1~20 km),由于水印制导信号的干涉主峰峰值强,易于探测,导引头中成像式探测器最先根据时序信息分辨出此激光峰值属于有效制导信号,并以此干涉主峰作为空域水印特性的识别起始点;其次,通过将导引头中成像式探测器接收的回波图样与预先设定的水印解码图样相对比,再次确定该制导信号是否为有效信号;最后,通过调整成像探测器的离轴角,使回波信号中干涉次峰光斑等距排列在中心主峰周围,从而完成对融合制导信号的时序特性及空域图样特性的双重探测.由于制导武器在制导末端的飞行速度约为700~800 m/s左右,因此,当制导距离小于1km时,制导武器靠其自身惯性完成对目标的精确打击.

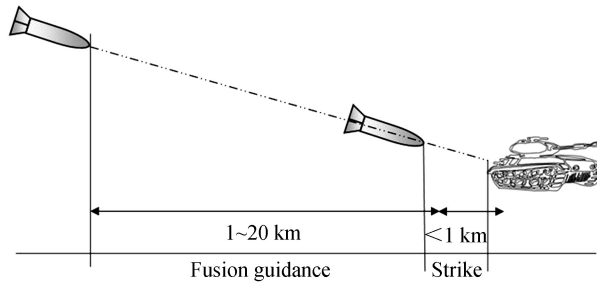


图2 末制导进程

Fig.2 Terminal guidance process

1.2 水印模型分析

图3是多子光束相干发射系统中子光源分布方式示意图,以三点子光源、四点子光源、五点子光源分布方式为例,如图3(a)~3(c).各子光源由同一激光光源发出,分布在半径为 d 的圆周上,具有高相干性^[10-12],子光源的不同分布方式决定了空域水印图样的多种明暗相间分布特性.

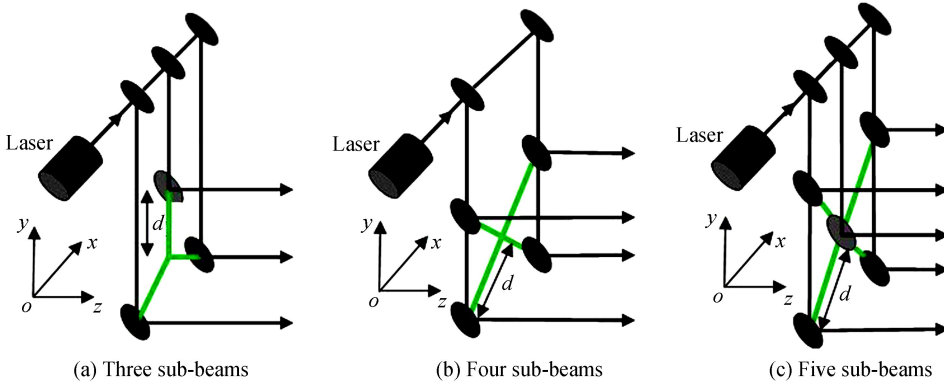


图3 子光源分布方式

Fig.3 Sub-beams distribution mode

通常情况下,激光器输出的激光光束为基模高斯光,当激光光束直接发射时,空间某点 (x, y, z) 处的光电场分布函数表示为

$$E(x, y, z) = \frac{Pc}{w(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{w(z)^2}\right] \exp\left\{-i\left\{k\left[z + \frac{x^2 + y^2}{2R(z)}\right] - \arctan\left(\frac{z}{f}\right)\right\}\right\} \quad (1)$$

式中, c 为常数因子, P 为激光总功率,其余各符号的计算公式为

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2}, R(z) = z + \frac{f^2}{z}, f = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}, w_0 = \frac{2\lambda}{\pi\theta} \quad (2)$$

式中, θ 是远场发散角, w_0 是基模高斯光束的束腰半径, f 是高斯光束的共焦参数, $R(z)$ 是与传播轴线相交于 z 点的高斯光束等相位面的曲率半径, $w(z)$ 是与传播轴线相交于 z 点的高斯光束等相位面上的光斑半径.

当多子光束相干发射时,设第 n 个子光束的中心坐标为 (x_m, y_m) ,子光束发射的激光光束在空间某点 (x, y, z) 处的光电场分布函数表示为

$$E_n(x, y, z) = \frac{P}{\sqrt{N}} \frac{c}{w(z)} \exp\left[-\frac{(x - x_m)^2 + (y - y_m)^2}{w(z)^2}\right] \times \exp\left\{-i\left\{k\left[z + \frac{(x - x_m)^2 + (y - y_m)^2}{2R(z)}\right] - \arctan\left(\frac{z}{f}\right)\right\}\right\} \quad (3)$$

总光电场分布表示为

$$E(x, y, z) = \sum_{n=1}^N E_n(x, y, z) \quad (4)$$

光场强度分布表示为

$$I(x, y, z) = E(x, y, z) \cdot E^*(x, y, z) \quad (5)$$

总功率分布表示为

$$P_{\text{sum}} = \iint I(x, y, z) dx dy \quad (6)$$

2 水印信号检测及效果分析

图4是时空域水印融合编码信号的检测系统结构框图,由多子光束相干发射系统发出的时空域水印融合编码信号到目标上,成像探测器接收回波信号,制导武器根据回波信号中的时空域水印特性完成对目标的打击.

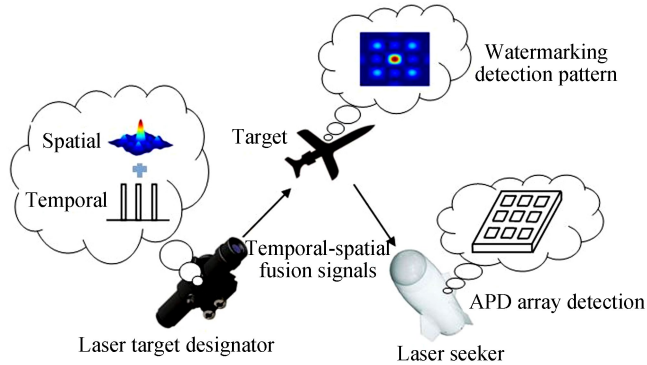


图4 水印制导信号探测系统

Fig.4 Watermark guidance signal detection system

图5为目标识别校准过程,当探测器接收到回波信号时,首先确定空域图样中干涉主峰所在位置,并设定为目标识别起始点.其次,通过调整成像探测器的离轴角使干涉次主峰光斑等距排列在以起始点为圆心的圆周上,从而完成对回波信号的识别与校准要求.

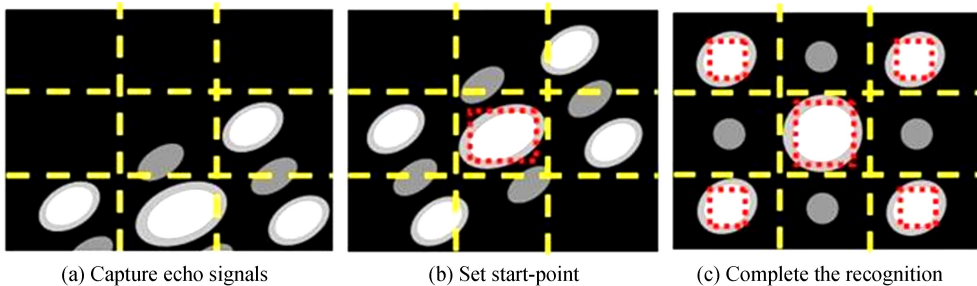


图5 目标识别与校准

Fig.5 Target recognition and calibration

图6为在同一远场位置处,不同光源分布的空域水印示意图,其中图6(a)~6(d)分别为图3给出的三种子光源分布以及单光束出射时所对应的空域水印图样光强分布情况.由图6(d)可知,当激光光束未经分束镜分束,而是直接出射形成激光制导信号时,激光光斑半径大,能量分布范围广,峰值功率低;由图6(a)~(c)可知,当相同功率条件下的激光光束经过分束镜被等功率的分为若干个子光束出射时,激光光斑在空间形成具有明暗相间分布特性的干涉图样,各图样中尖峰位置强度分布各异,在空域内形成差异明显,辨识度高的明暗相间分布特性,干涉子光斑的光斑半径小,能量集中在各个干涉光斑内,峰值功率高.

图7为不同子光束分布沿 x 轴线方向干涉主峰强度与单光束发射时峰值强度之比, I_m 表示单光束发射时激光光束的峰值强度, I_0 、 I_1 、 I_2 、 I_3 分别表示单光束、三点子光束、四点子光束、五点子光束时 x 轴线方向的强度.由图7可知,空域水印图样中干涉主峰强度为单光源中心强度的 N 倍(N 为多子光源个数),其原因在于中心光强为 I_m 的激光光束被等强度地分为 N 个子光束,子光束的光强均为 I_m/N ,子光束在空域内相遇产生干涉效应其主峰强度为 $N^2 \cdot (I_m/N)$,即 $N I_m$;次主峰以主峰中心呈对称分布态势,且次主峰强度高

于单光源发射中心强度 2 倍左右;子光束干涉的光斑半径约为单光束出射光斑半径的 1/4.由此可知,将传统激光光束经分束镜作用后形成的空间干涉编码信号,相比于传统激光照射产生的制导信号,在强度特性、分布特性等方面均有提升.

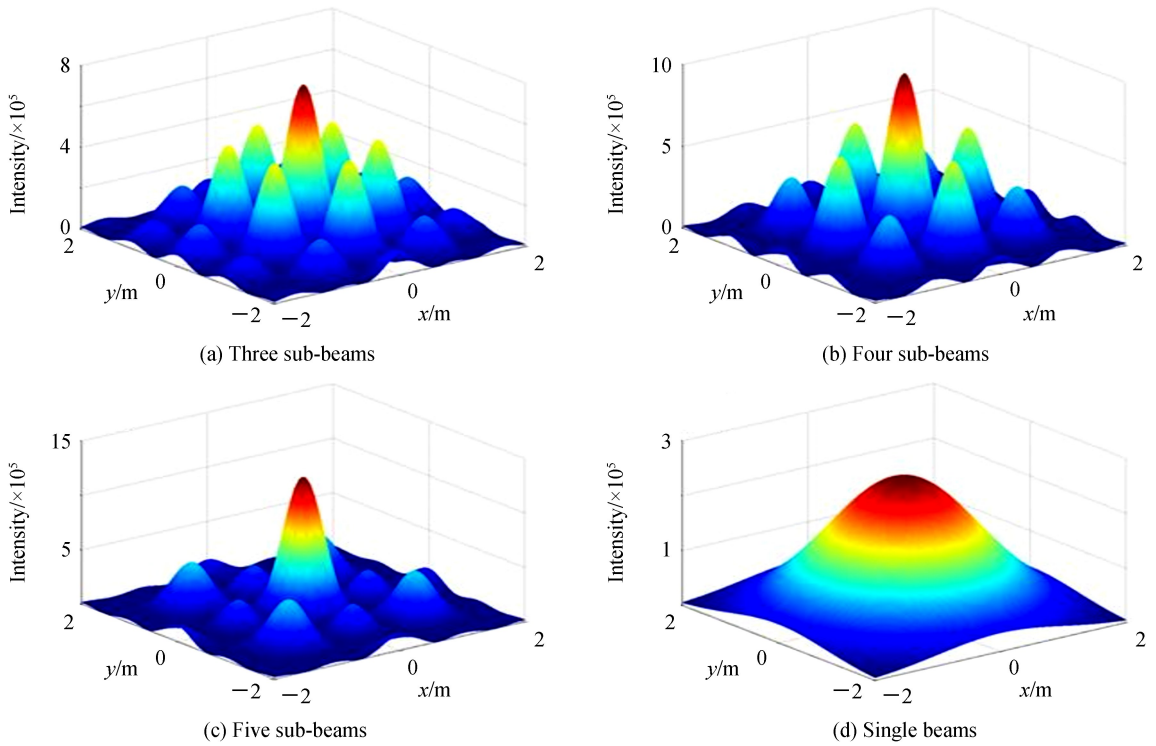


图 6 空域水印图样
Fig.6 Spatial watermark pattern

图 8 为子光束个数分别为 2、3、4、5、6 个时,次主峰峰值强度与单光束发射时峰值强度之比.由图 8 可知,当子光束个数大于 4 时,次主峰峰值强度非但没有增加反而迅速减弱,其原因在于系统中采用圆周型子光束分布方式,子光束个数越多,填充因子越高,干涉图样的主极大越强,旁瓣越小,甚至可能淹没在噪声中^[13-15],使多光束干涉退化为单光束情况,导致空域水印图形不具有空域明暗分布特性.

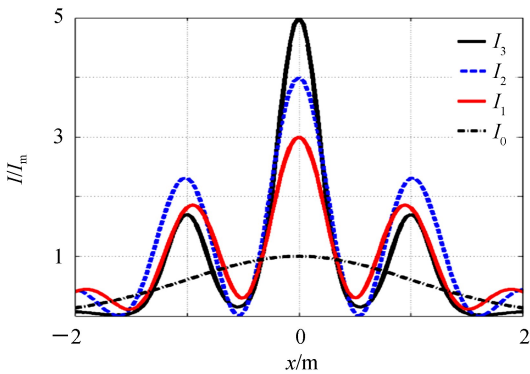


图 7 多子光束干涉主峰强度与单光束发射峰值之比
Fig.7 Ratio of main peak intensity to single beam maximum intensity

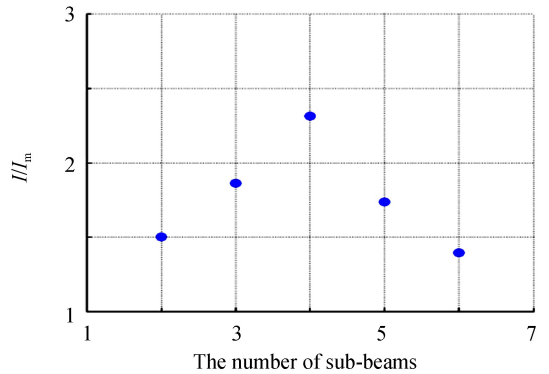


图 8 不同子光束个数条件下干涉次主峰强度与单光束发射峰值之比
Fig.8 Ratio of secondary peak intensity to single beam maximum intensity

综上所述,在圆周型子光束分布方式中,选用方正四点子光束分布方式为最优分布,由此产生的干涉图样明暗相间分布特性最为明显,易于探测.提出的空域水印特性在体现干涉图样明暗强度可编码性的同时,又将激光光束的能量集中到干涉相长区域,在几乎不损失激光功率的条件下提高了激光目标指示器的作用距离,使时空域水印融合编码信号更易被激光导引头中的探测器识别.

3 系统抖动与控制

多子光束相干发射系统是时空域水印融合制导系统的核心组件,在实际应用中,需要考虑发射系统机械振动等固有因素对空域水印图样干涉特性的影响.通过分析多子光束分束镜在不同位置偏移、不同角度偏离情况下空域水印图样的抖动情况,得到实际应用中相干发射系统所需要的机械控制精度.

3.1 位置偏移

以五点子光源为模型进行讨论.假定在 t 时刻多子光束相干发射系统中分束镜的位置发生随机偏移,使分束镜在 xoy 平面内沿 y 轴方向移动距离 δ_n , n 为分束镜序号,其位置偏移示意图如图 9.

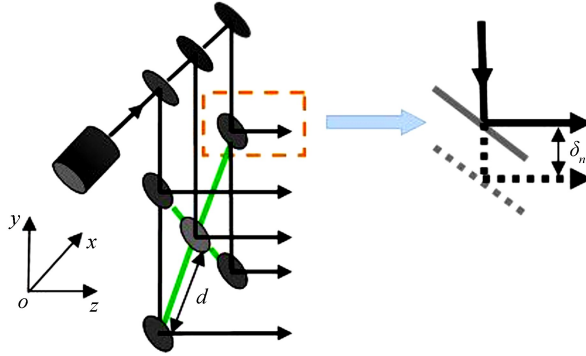


图 9 分束镜位置偏移

Fig.9 Beam splitter position offset

此时,空域水印图样的光电场分布函数表示为

$$E_n(x, y, z) = \frac{P}{\sqrt{N}} \frac{c}{w(z + \delta_n)} \exp\left[-\frac{(x - x_m)^2 + (y - y_m - \delta_n)^2}{w(z + \delta_n)^2}\right] \times \exp\left\{-i\left\{k\left[z + \delta_n + \frac{(x - x_m)^2 + (y - y_m - \delta_n)^2}{2R(z + \delta_n)}\right] - \arctan\left(\frac{z + \delta_n}{f}\right)\right\}\right\} \quad (7)$$

计算在不同位置偏移控制精度 δ 情况下,空域水印图样的光场强度分布情况,如图 10,图 10(a)为 $\delta = 0.4\lambda$,图 10(b)为 $\delta = 0.2\lambda$.

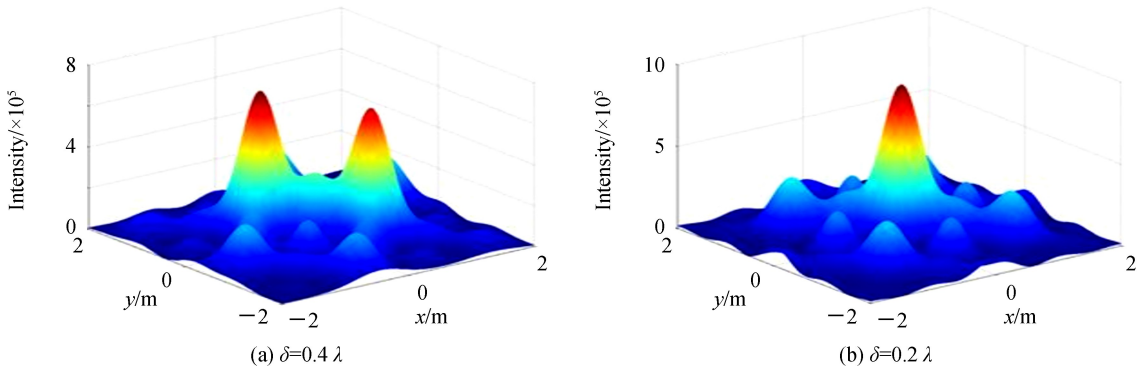


图 10 不同位置偏移精度下空域水印图样

Fig.10 Spatial watermark pattern with different δ

由图 10 可知,不同控制精度条件下,空域水印图样的光场强度分布不稳定,且差异较大.水印图样主峰峰值不再是单光源发射时的 5 倍,且同一光场位置处光场强度可能较小也可能较大.其原因在于分束镜位置发生随机抖动,导致各子光束的初始相位差发生变化,由干涉理论可知,光程差相差 λ ,初始相位差变化 2π ,因此分束镜的微小抖动会使干涉图样发生剧烈变化.

图 11 为不同位置偏移控制精度 δ 条件下,水印图样主峰峰值与单光源发射峰值的比值变化情况,由此确定实际应用中分束镜所需要的位置偏移控制精度 δ .图中横坐标为 t/t_0 ,表示重复实验的次数,纵坐标为 I/I_m ,表示水印图样主峰峰值与单光源发射峰值的比值.为排除仿真实验的偶然性,对满足不同控制精度的

实验系统分别进行 60 次重复实验,每次实验中 δ_n 的取值都是随机的,且取值范围为 $\pm\delta$ 。

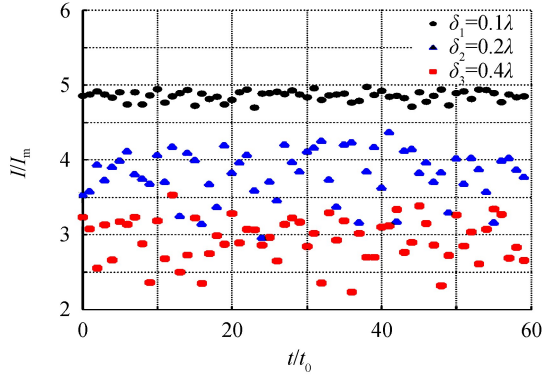


图 11 不同位置偏移控制精度下 I/I_m 的变化情况
Fig.11 Value of I/I_m with different δ

从图 11 可知,当位置偏移控制精度为 0.4λ 时,二者比值在 $2.2\sim 3.5$ 范围内浮动明显且呈现随机分布态势,水印图样的光场强度不稳定;当位置偏移控制精度为 0.2λ 时,二者比值在 $3.0\sim 4.4$ 之间浮动,随机分布态势没有得到明显改善;当位置偏移控制精度为 0.1λ 时,二者比值接近于 5,起伏程度得到有效抑制,此时水印图样光场稳定性良好.由此得到,多子光束相干发射系统中分束镜的位置偏移控制精度为 0.1λ 。

3.2 角度偏离

设定在 t 时刻分束镜角度发生随机抖动,使分束镜在 $yo z$ 平面内发生一定的角度偏离 $\delta_{\theta n}(t)$,如图 12。

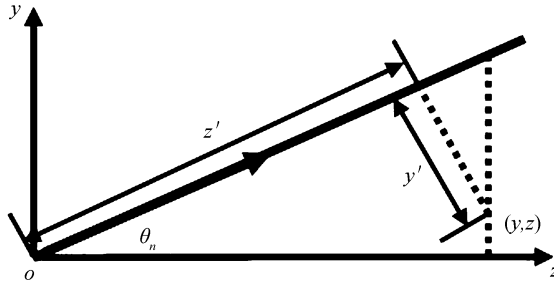


图 12 分束镜角度偏离
Fig.12 Beam splitter angle deviation

这种情况下,计算水印图样的光电场分布函数应修改为

$$E_n(x, y, z) = \frac{P}{\sqrt{N}} \frac{c}{\omega(z')} \exp\left[-\frac{(x-x_{nm})^2 + y'^2}{\omega(z')^2}\right] \times \exp\left\{-i\left\{k\left[z' + \frac{(x-x_{nm})^2 + y'^2}{2R(z')}\right] - \arctan\left(\frac{z'}{f}\right)\right\}\right\} \quad (8)$$

式中, z' 和 y' 的表达式如式(9),其中, z' 为各子光束到 (y, z) 点处的实际传输距离, y' 为 (y, z) 点距目标表面中心位置的距离。

$$\begin{cases} z' = \frac{z}{\cos(\delta_{\theta n})} - z \tan(\delta_{\theta n}) - (y - y_{nm}) \sin(\delta_{\theta n}) \\ y' = [z \tan(\delta_{\theta n}) - (y - y_{nm})] \cos(\delta_{\theta n}) \end{cases} \quad (9)$$

计算得到不同偏离控制精度 δ_θ 情况下,水印干涉图样的光场强度分布情况,如图 13,其中(a)、(b)图分别为偏离精度 $\delta_\theta = \theta_0$, $\delta_\theta = 0.5\theta_0$ 时的水印干涉图样。

图 13 表明在不同角度偏离条件下,水印干涉图样光场强度分布发生变化,干涉主峰峰值不再是单光源发射时的 5 倍,且同一光场位置处强度可能较小也可能较大.其原因在于分束镜发生角度偏离时,水印图样区域相位分布复杂多变,子光束的等相位面发生倾斜,使水印干涉图样呈现不规则的相干相长或相干相消。

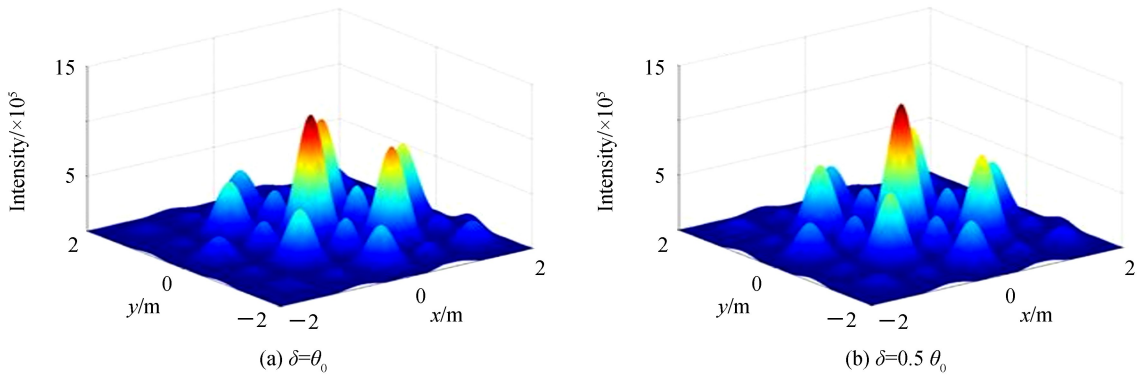


图 13 不同角度偏离精度下空域水印图样

Fig.13 Spatial watermark pattern with different δ_θ

图 14 为不同角度偏离控制精度 δ_θ 条件下, 水印图样主峰峰值与单光源发射峰值的比值变化情况, 由此确定实际应用中分束镜所需要的角度偏离控制精度 δ_θ . 为排除仿真实验的偶然性, 对满足不同控制精度的实验系统分别进行了 60 次重复实验, 每次实验中 δ_{θ_n} 的取值都是随机的, 且取值范围为 $\pm \delta_\theta$.

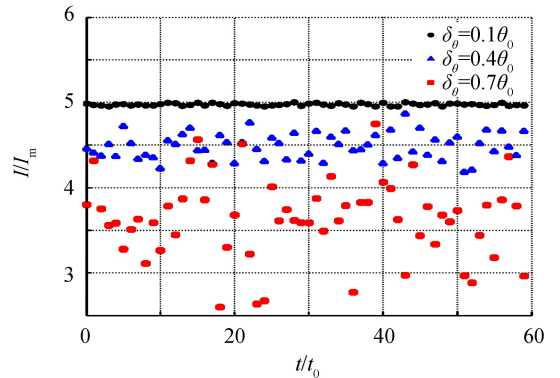
从图 14 可知, 当 δ_θ 为 $0.7\theta_0$ 时, 二者比值在 2.5~4.7 范围内浮动明显且呈现随机分布态势; 当 δ_θ 为 $0.4\theta_0$ 时, 二者比值在 4.2~4.9 之间浮动, 随机分布态势有所改善; 当 δ_θ 为 $0.1\theta_0$ 时, 二者比值接近于 5, 起伏程度得到有效抑制, 此时水印干涉图样光场稳定性很好. 由此得到, 多子光束相干发射系统分束镜的角度偏离控制精度是 $0.1\theta_0$.

4 结论

提出一种时空域融合制导方式, 利用多子光束干涉构图思想, 将编码信号的空域信息与传统编码的时域信息融合, 形成时空域“水印密钥”融合制导信号; 设计一种多子光束相干发射系统, 该系统将来自于同一激光器的激光光束等功率的分为 N 个子光束, 依据子光束良好的空间相干性, 实现空域水印图样与时域编码信号的紧密融合. 建立模型分析, 空域干涉法将激光能量集中到干涉相长区域, 水印干涉图样主峰峰值为单光束发射峰值的 N 倍 (N 为多子光束个数), 当子光束发射系统采用四点子光束分布时, 次主峰峰值强度最大, 空域水印图形成明暗相间特性最为明显, 由此确定圆周型四点子光束分布方式为最优分布方式. 考虑到机械振动等因素对制导系统的影响, 子光束相干发射系统中分束镜所需的位置偏移控制精度为 0.1λ , 角度偏离控制精度为 $0.1\theta_0$. 提出的基于多子光束干涉实现的时空域“水印密钥”融合制导技术, 具有空域编码灵活多样, 编码引起的激光能量损失小, 光束质量几乎不受影响, 将干涉主峰作为编码基准易于确定识别等制导优势.

参考文献

- [1] LIU Feng, YING Jia-ju, LIU Ming-ming. An analysis on set-forward of laser guide active jamming[C]. SPIE, 2013, 8906: 89061G.
- [2] LUO Hai-bo, XU Ling-yun, HUI Bin, et al. Status and prospect of target tracking based on deep learning[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5):6-12.
罗海波, 许凌云, 惠斌, 等. 基于深度学习的目标跟踪方法研究现状与展望[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(5):6-12.
- [3] MIAO Xi-kui, ZHAO Wei, ZHANG Heng-wei, et al. Research of laser encoding method based on time-controlled pulse interval[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10):51-58.
苗锡奎, 赵威, 张恒伟, 等. 时间控制脉冲间隔激光编码方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(10):51-58.
- [4] LI Jian-zhong, PENG Qi-xian, LI Ze-ren, et al. Technology of missile-borne laser active imaging guidance[J]. *Infrared*

图 14 不同角度偏离精度下 I/I_m 的变化情况Fig.14 Value of I/I_m with different δ_θ

- and Laser Engineering*, 2014, **43**(4):1117-1123.
- 李建中, 彭其先, 李泽仁, 等. 弹载激光主动成像制导技术发展现状分析[J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(4):1117-1123.
- [5] YANG Xing-yu, SU Jin-san, WANG Yuan-qing, *et al.* Laser coding drive control in 3D LADAR[J]. *Laser Journal*, 2016, **37**(2):103-105.
- 杨兴雨, 苏金善, 王元庆, 等. 3D激光雷达中激光编码器的驱动控制[J]. 激光杂志, 2016, **37**(2):103-105.
- [6] ZHANG Shuai, LIU Zhi-guo, WANG Shi-cheng, *et al.* Research on modeling and simulation of high repetition laser jamming laser guidance weapon[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(3):125-130.
- 张帅, 刘志国, 王仕成, 等. 高重频激光干扰制导武器建模与仿真评估研究[J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(3):125-130.
- [7] LI Hui, GAN Lin, ZHANG Wen-pan, *et al.* Simulation precision analysis of line of sight between bomb and target on hardware in the loop system for laser guided weapon countermeasure[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, **52**(1):103-111.
- 李慧, 甘霖, 张文攀, 等. 激光制导武器对抗半实物仿真弹干视线角模拟精度分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, **52**(1):103-111.
- [8] YANG Fang, ZHANG Xin, HE Yan, *et al.* Fiber laser ranging system based on different pseudorandom code modulation[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2014, **41**(6):270-275.
- 杨芳, 张鑫, 贺岩, 等. 基于不同伪随机码调制的光纤激光测距系统[J]. 中国激光, 2014, **41**(6):270-275.
- [9] SHEN Shan-shan, CHEN Qian, HE Wei-ji, *et al.* Research on performance of random bitstream ranging system based on single photo detection theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(10):131-138.
- 沈姗姗, 陈钱, 何伟基, 等. 基于单光子探测机理的伪随机码测距性能研究[J]. 光学学报, 2014, **34**(10):131-138.
- [10] WU Zi-hao, CHEN Zi-yang, PU Ji-xiong, *et al.* Generation of a new kind partially coherent beam and its coherent properties[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(5):0526002.
- 吴子豪, 陈子阳, 蒲继雄, 等. 新型部分相干光束的产生及其相干特性[J]. 光子学报, 2017, **46**(5):0526002.
- [11] LIAN Tian-hong, WANG Shi-yu, CAI De-fang, *et al.* Coherent emitting of multiple sub-beams for small target detection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(3):136-144.
- 连天虹, 王石语, 蔡德芳, 等. 多子光束相干发射小目标探测研究[J]. 物理学报, 2014, **63**(3):136-144.
- [12] YUN Jian, GAO Cun-xiao, ZHU Shao-lan, *et al.* High-peak-power, single-mode, nanosecond pulsed, all-fiber laser for high resolution 3D imaging LIDAR system[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, **10**(12):39-41.
- [13] SHEN Jing, XIONG Wei, SHI Hai-liang, *et al.* Phase detection and drift correction for Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(9):0903003.
- 沈静, 熊伟, 施海亮, 等. 非对称空间外差干涉仪相位探测和漂移校正[J]. 光子学报, 2017, **46**(9):0903003.
- [14] YANG Yang, LIU Xue-bin. Exposure time control of large aperture static imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(11):1123004.
- 杨阳, 刘学斌. 大孔径静态干涉成像光谱仪曝光时间控制技术[J]. 光子学报, 2015, **44**(11):1123004.
- [15] LAI Zhi, GUO Liang, LI Xiao-zhen, *et al.* Application of machine vision to the measurement of the effective d31 coefficient in laser interferometry[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(18):213-217.
- 来志, 郭亮, 李小珍, 等. 机器视觉在激光干涉测量 d31 中的应用[J]. 物理学报, 2013, **62**(18):213-217.

Foundation item: National Defense Pre-research Foundation of China (No.9140A020105)

引用格式: WU Meng-yao, WANG Shi-yu, QU Peng-fei, *et al.* Study on Temporal-spatial Fusion Guidance Based on Laser Multiple Sub-beams Interference[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(10):1014004

吴梦瑶, 王石语, 屈鹏飞, 等. 多子光束干涉时空域融合制导技术[J]. 光子学报, 2018, **47**(10):1014004