

半主动寻的激光制导系统的干涉编码方法

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, 陕西 西安 710071;

2. 西安机电信息技术研究所 第二研发部, 陕西 西安 710065)

摘要: 提出一种半主动寻的激光制导干涉编码方法, 在传统时序编码基础上加入多子光束相干发射系统产生的空间干涉图样, 形成时空域相融合的编码信号。设计一种多子光束相干发射系统, 依据子光束良好的空间相干性进行空间构图, 形成编码可控的空间干涉图样。计算结果表明: 当参数 K 值 (子光束对角线之比) 在 2.5~3.5 之间时, 干涉图样明暗相间程度最为明显, 干涉图样最为纯净; 当子光束相干发射系统中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制导系统的影响可忽略不计。

关键词: 干涉编码; 多子光束干涉; 相干发射系统; 半主动寻的

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0206005

Interference encoding method of semi-active homing laser-guided system

Wu Mengyao¹, Wang Shiyu¹, Qu Pengfei², Guo Zhen¹, Cai Defang¹, Li Bingbin¹

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

2. The Second Research and Development Department, Xi'an Institute of Electro-mechanical Information Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: The interference encoding method of semi-active homing laser-guided system based on multiple sub-beams interference was proposed. The spatial interference pattern was combined with the temporal coded signal to produce a new temporal-spatial coded signal. A coherent emission system of multiple sub-beams was designed, the laser was divided into several equal power sub-beams which could produce an effective spatial interference pattern due to their coherence. Calculation results show that the interference pattern presents special distribution features of alternating brightness and darkness. When the value of K (the ratio of diagonal) is between 2.5 to 3.5, the interference pattern is most obvious and pure. When the position offset and angle deviation of the beam splitter are less than 0.1λ (λ is the wavelength) and $0.1\theta_0$ (θ_0 is the beam divergence angle) in the sub-beams coherent emission system, respectively, the effect of mechanical vibration on the interference emission system could be ignored.

Key words: interference encoding; multiple sub-beams interference; coherent emission system; semi-active homing

收稿日期: 2018-09-10; 修订日期: 2018-10-20

基金项目: 国家预研究基金(9140A020105)

作者简介: 吴梦瑶(1992-), 女, 博士生, 主要从事新型光电子器件方面的研究。Email: 15094015115@163.com

导师简介: 王石语(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事新型光电子器件方面的研究。Email: yshi@mail.xidian.edu.cn

0 引言

激光半主动寻的制导武器以其打击精度高,军事用途广、结构简捷、成本低等优势,在现代战争中扮演着不可或缺的重要角色^[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识别,进而对目标实施打击。由此可见,激光编码技术是半主动寻的制导系统的关键技术之一。

现有的激光编码方式主要有:周期型编码、等差型编码、伪随机编码、脉宽编码等。这些编码方式的共通点是编码只由时序方式产生具有一定的规律性^[4-6],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^[7-8]。

文中将激光干涉技术与传统时序编码技术相融合,提出一种激光干涉编码半主动寻的制导技术,利用多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,这种空间分布使制导信号在已有的时序编码基础上增加一层空间干涉图样,激光导引头可以根据干涉图样中的空间数据结构对回波信号进行“敌我”识别。制导系统采用子光束干涉方法进行构图的优势在于,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,激光光束发散角小,能量集中。文中设计了一种基于激光干涉法的半主动寻的制导系统,通过子光束相干原理分析得到最优干涉分布方式,给出了导引头中成像探测器的识别方式,讨论了分束镜固有抖动对激光干涉效果的影响,得到了在可识别条件下分束镜的抖动控制精度。

1 激光干涉编码方案及图样分析

1.1 激光干涉编码方案

激光干涉编码半主动寻的制导系统要求激光

目标指示器发出带有干涉图样的编码信号,干涉图样由子光束发射系统生成,在时序编码的基础上,形成时空域相融合的制导信号;该制导信号直接作用在打击目标上,经由目标反射的回波信号被激光导引头中成像探测器接收;激光导引头并非采用传统半主动寻的制导武器使用的四象限探测器,而是采用激光成像式探测器,要求成像探测器可以依照预先设定的干涉图样解码特性对回波信号进行快速准确的识别。需要强调的是激光目标指示器位置固定,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。激光导引头利用成像式探测器对干涉图样进行成像,同时保证在导引头运动过程中,像的尺寸不会超出成像阵列的尺寸。激光目标指示器中子光源分布的多样性决定空域干涉图样的多样性。

1.2 干涉模型分析

图 1 是子光束相干发射系统示意图,各子光束由同一激光光源发出,具有高相干性。引入参数 K 表示子光束对角线 l_{ab} 与 l_{cd} 之比,讨论不同值条件下,干涉图样干涉特性变化情况。

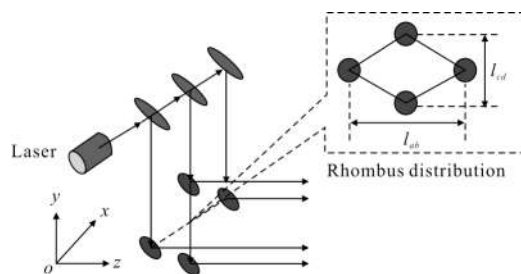


图 1 子光束分布方式

Fig.1 Sub-beams distribution mode

以基模高斯光为例,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^[9]如公式(1)所示:

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

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如公式(2)所示:

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

式中： θ 为远场发散角； w_0 为基模高斯光束的束腰半径； f 为高斯光束的共焦参数； $R(z)$ 为与传播轴线相交于 z 点的高斯光束等相位面的曲率半径； $w(z)$ 为与传播轴线相交于 z 点的高斯光束等相位面上的光斑半径^[10-12]。

当子光束相干发射时，设第 n 个子光束的中心坐标为 (x_{nn}, y_{nn}) ，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^[13]如公式(3)所示：

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

总光电场分布如公式(4)所示：

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

光场强度分布如公式(5)所示：

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

总功率分布如公式(6)所示：

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

1.3 图样分析

图 2 为不同 K 值条件下干涉图样示意图，其中图 2(a)~(c) 分别是 K 取 2、3、4 时干涉图样光强分布情况。由图 2 可知，不同参数 K 对应不同空间干涉图样，各图样中主峰位置固定，双次主峰等距分列在主峰两侧，三者构成直线分布态势，激光导引头中的激光成像式探测器根据这种明暗相间特性完成对干涉编码信号的提取，图 2 中所示光斑为目标位置处光斑大小，经目标反射后导引头成像探测器中干涉图

样成像大小在毫米量级。提取过程是：首先确定主峰所在位置并设置其为解码开始点，然后在开始点两侧寻找等距排列的次主峰光斑，进而完成对干涉编码信号的提取。

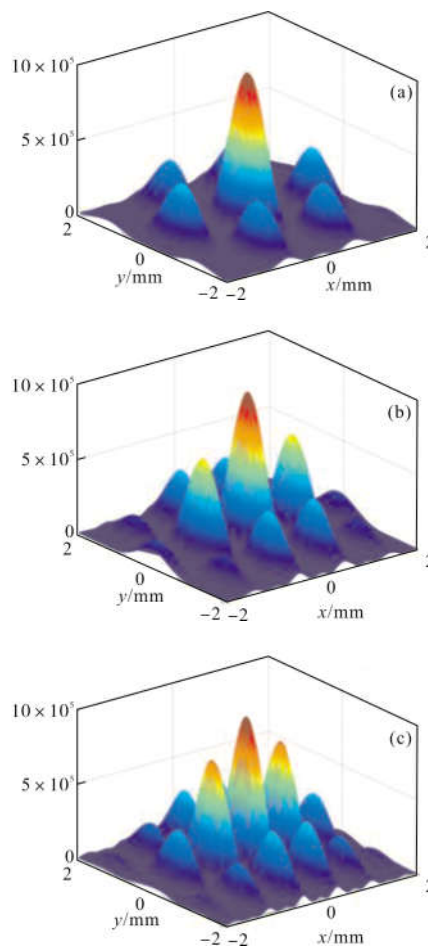


图 2 空间干涉图样

Fig.2 Spatial interference pattern

图 3 为不同 K 值条件下沿 x 轴线方向干涉图样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 表示干涉图样 x 轴线方向的光强。由图 3 可知，不同 K 值条件下，干涉主峰峰值均为单光束发射峰值强度的 4 倍，其原因在于当中心光强为 I_m 的激光光束被等强度地分为 N 个子光束时，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 NI_m ；次主峰以主峰中心呈对称分布态势，次主峰强度均高于单光源中心强度，当 K 值取 2.5~3.5 时，次主峰强度为单光束发射峰值强度的 2~3 倍。

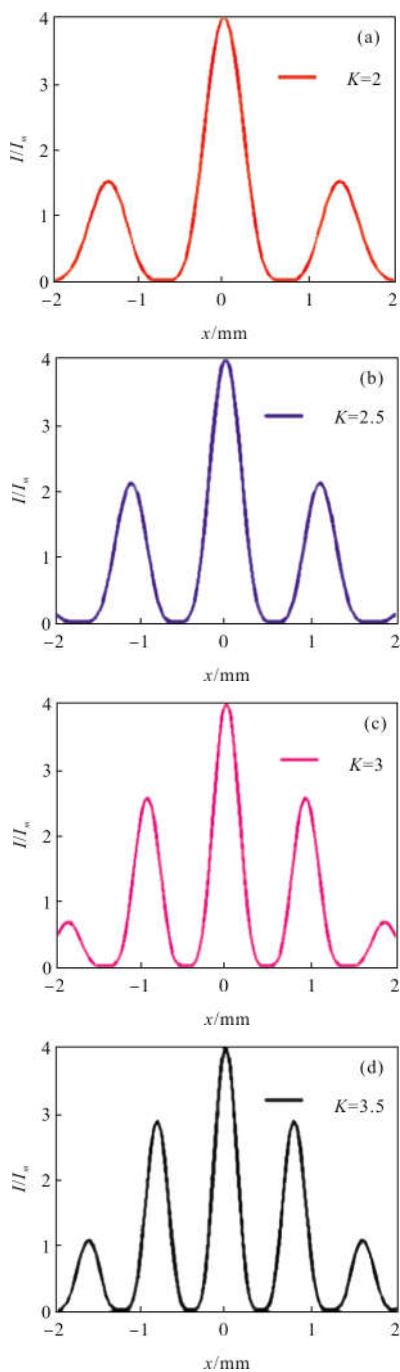


图 3 光强分布

Fig.3 Light intensity distribution

图 4 是当 K 值在 2~4 范围内变化时,次主峰能量占干涉图样总体能量百分比的变化情况。从图中可以看出,当 K 值在 2.5~3.5 间变化时,次主峰能量较高,易于识别,当 K 值小于 2.5 或大于 3.5 时,次主峰能量较低,其原因在于:系统采用多子光束分布方式, K 值较小时,干涉效应不明显,主峰能量高,旁瓣能量较低;随着 K 值的增加,干涉效应逐

渐增强,次主峰峰值虽然增加但其宽度变窄,能量占有比例降低,相邻峰值的间距变小^[14-16],干涉图样出现众多干涉旁瓣,导致干涉图样不清晰,降低探测器对干涉图样特性的判别能力。由此可得,多子光束对角线之比在 2.5~3.5 之间时,干涉图样最为纯净,识别特性最为明显,是最优子光束分布方式。

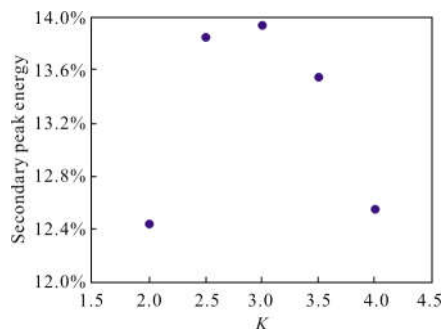


图 4 次主峰能量百分比

Fig.4 Percentage of secondary peak energy

2 系统抖动与控制

子光束相干发射系统是干涉编码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干涉图样干涉特性的影响。通过分析子光束分束镜在不同位置偏移、不同角度偏离情况下干涉图样的抖动情况,得到实际应用中相干发射系统所需要的机械控制精度。

2.1 位置偏移

假定在 t 时刻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 $\delta_n(t)$,其位置偏移示意图如图 5 所示。此时,干涉图样的光电场分布函数如公式(7)所示:

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

计算在不同位置偏移精度 δ 情况下,干涉图样的光场强度分布情况,如图 6 所示,图 6(a)为 $\delta_n = 0.4 \lambda$,图 6(b)为 $\delta_n = 0.2 \lambda$ (λ 为激光波长)。

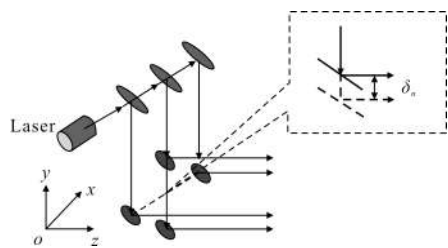


图 5 分束镜位置偏移

Fig.5 Beam splitter position offset

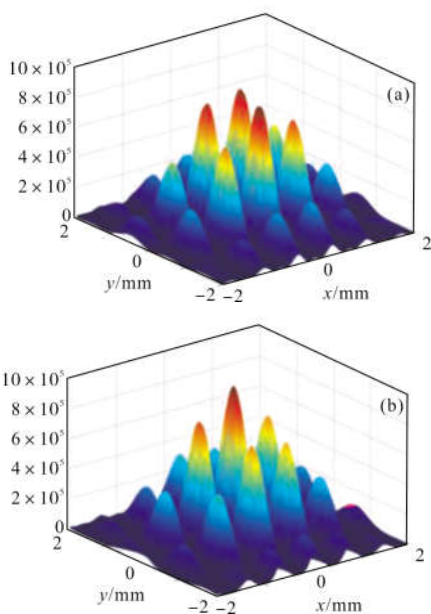


图 6 不同位置偏移精度下干涉图样

Fig.6 Interference pattern with different position migration accuracy

由图 6 可知,在不同精度条件下,干涉图样的光场强度分布不稳定,且差异较大。干涉图样主峰峰值不再是单光源发射时的 4 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 7 为不同位置偏移精度 δ 条件下,干涉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 7 中横坐标为 t/t_0 , 表示重复实验的次数,纵坐标为 III_m , 表示干涉图样主峰峰值与单光源发射峰值的比值。从图中可以看出,当位置偏移精度为 0.5λ 时,二者比值在 $1.2 \sim 2.5$ 范围内浮动明显且呈现随机

分布态势,干涉图样的光场强度不稳定;当位置偏移精度为 0.3λ 时,二者比值在 $2.0 \sim 3.4$ 之间浮动,随机分布态势没有得到明显改善;当位置偏移精度为 0.1λ 时,二者比值接近于 4,起伏程度得到有效抑制,此时干涉图样光场稳定性良好。由此得到,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 。

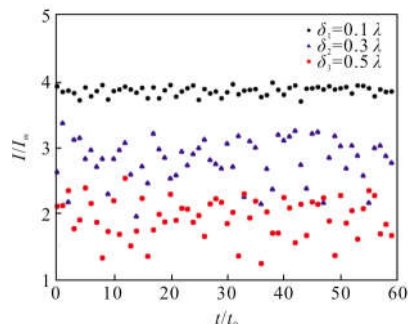


图 7 不同位置偏移精度 δ 下抖动情况

Fig.7 Jitter under different position offset accuracy δ

2.2 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 8 所示。

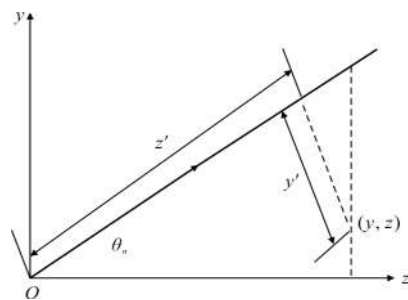


图 8 分束镜角度偏离

Fig.8 Beam splitter angle deviation

这种情况下,计算干涉图样的光电场分布函数应修改如公式(8)所示:

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

公式(8)中 z' 和 y' 的表达式如公式(9)所示:

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

式中： 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。

计算得到不同偏离精度 δ_{θ} 情况下，干涉图样的光场强度分布情况，如图 9 所示，其中图 9(a)、(b) 分别为偏离精度 $\delta_{\theta} = \theta_0, \delta_{\theta} = 0.5 \theta_0$ 时的干涉图样。

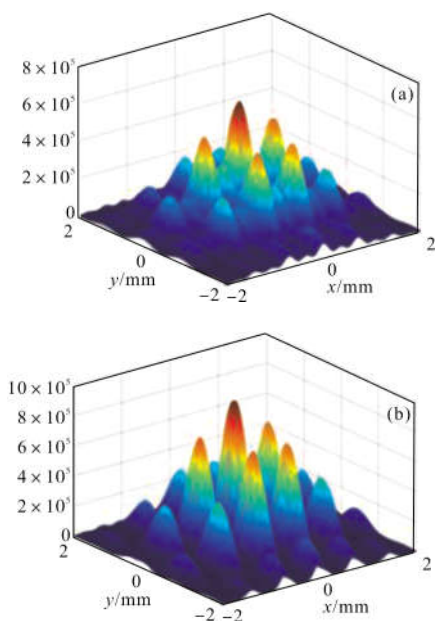


图 9 不同角度偏离精度下空域干涉图样

Fig.9 Spatial interference pattern with different angles deviation accuracy

图 9 表明在不同角度偏离条件下，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 4 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，干涉图样区域相位分布复杂多变，子光束的等相位面发生倾斜，使干涉图样显现不规则的相干相长或相干相消现象。

图 10 为不同角度偏离精度 δ_{θ} 条件下，干涉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} 。

从图 10 中可以看出，当 δ_{θ} 为 $0.7 \theta_0$ 时，二者比值在 1.5~3.7 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 3.2~3.9 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 4，起伏程度得到有效抑制，此时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 $0.1 \theta_0$ 。

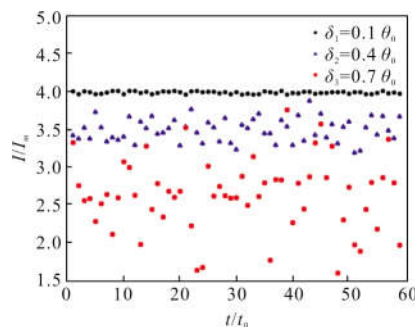


图 10 不同角度偏离精度 δ_{θ} 下抖动情况

Fig.10 Jitter with different angles deviation accuracy δ_{θ}

3 结论

文中提出一种激光干涉编码半主动寻的制导方式，利用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相结合，形成时空域融合制导信号；设计一种多子光束相干发射系统，依据子光束良好的空间相干性，实现空域干涉图样与时域编码信号的紧密融合。分析得到，干涉图样主峰峰值为单光束发射峰值的 4 倍；当子光束对角线之比在 2.5~3.5 之间时，干涉次主峰强度是单光束发射峰值的 2~3 倍，此时干涉图样最为纯净，识别特性最为明显，是最优子光束分布方式；激光成像式探测器根据主次峰中心对称明暗相间分布特性完成对编码信号的提取；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 $0.1 \theta_0$ 。文中提出的激光干涉编码方法，在时序编码的基础上增加空间干涉图样特征的识别，可提高制导系统的抗干扰能力，更多问题需要进一步研究。

参考文献：

- [1] Zhang Junqiang, Xie Fei, Xue Qingsheng, et al. Laser guided lens based on four-quadrant detector[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2015, 8(3): 471-479. (in Chinese)
- [2] Wang Kuangbiao. Status quo, key technology and development of laser guided weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 651-655. (in Chinese)

- [3] Miao Xikui, Zhao Wei, Zhang Hengwei, et al. Research of laser encoding method based on time-controlled pulse interval [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1006002. (in Chinese)
- [4] Li Jianzhong, Peng Qixian, Li Zeren, et al. Technology of missile-borne laser active imaging guidance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (4): 1117-1123. (in Chinese)
- [5] Zhang Xin, Du Zhiyuan, Qiao Yanfeng, et al. Study on linear field of strapdown semi-active laser seeker [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2015, 8 (3): 415-421. (in Chinese)
- [6] Luo Haibo, Xu Lingyun, Hui Bin, et al. Status and prospect of target tracking based on deep learning [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (5): 0502002. (in Chinese)
- [7] Yang Fang, Zhang Xin, He Yan, et al. Fiber laser ranging system based on different pseudorandom code modulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(6): 270-275. (in Chinese)
- [8] Shen Shanshan, Chen Qian, He Weiji, et al. Research on performance of random bitstream ranging system based on single photon detection theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 131-138.
- [9] Fan Jinping, Xu Xiaofei, Zhang Wangping, et al. Multi-wavelength phase-shifting interferometry based on principal component analysis [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(10): 221-230. (in Chinese)
- [10] Guo Fudong, Tang Feng, Lu Yunjun, et al. Rapid adjustment and measurement for subaperture stitching interferometry [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(10): 2682-2688. (in Chinese)
- [11] Lian Tianhong, Wang Shiyu, Cai Defang, et al. Coherent emitting of multiple sub-beams for small target detection [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(3): 136-144. (in Chinese)
- [12] Chen Fei, Chai Jinhua, Liu Xin. Laser jamming scheme and experiment research of quasi parallel light interference [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0706001. (in Chinese)
- [13] Han Yongchang, Hu Wenhui, Yu Jie, et al. Interference of dissociating wave packets in the I₂ molecule driven by femtosecond laser pulses [J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(11): 4834-4839. (in Chinese)
- [14] Wang Leijie, Zhang Ming, Lu Sen, et al. Ultra-precision control of homodyne frequency-shifting interference pattern phase locking system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25 (5): 1213-1221. (in Chinese)
- [15] Gao Hongyi, Chen Jianwen, Xie Honglan, et al. A new method for building an atomic matter-wave interferometry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51 (8): 1696-1699. (in Chinese)
- [16] Qi Ziwen, Liu Bingguo, Zhang Zhonghai, et al. Comparison of phase extraction algorithms in testing of phase defects with two-point interference [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2016, 9(4): 483-490. (in Chinese)