

一种多波长多编码合束输出的新型激光源研究

郑雅文, 陈国胜, 陈文建, 胥浩, 李武森

Research on a new type of laser source with combined multi-wavelength and multi-coding beam output

引用本文:

郑雅文,陈国胜,陈文建,胥浩,李武森. 一种多波长多编码合束输出的新型激光源研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(5): 632–638.

ZHENG Yawen, CHEN Guosheng, CHEN Wenjian, et al. Research on a new type of laser source with combined multi-wavelength and multi-coding beam output[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(5): 632–638.

您可能感兴趣的其他文章

1. Micro-LED蓝宝石衬底AlN上GaN激光剥离研究

引用本文: 张俊, 张为国. Micro-LED蓝宝石衬底AlN上GaN激光剥离研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(1): 25–31.

2. 905nm InGaAs脉冲激光二极管驱动电流特性分析与测试

引用本文: 李勇军, 邹建, 甘泉露, 等. 905nm InGaAs脉冲激光二极管驱动电流特性分析与测试[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 803–806.

3. 水导激光技术中水-光耦合传能规律研究

引用本文: 张光辉, 黄宇星, 黄平, 等. 水导激光技术中水-光耦合传能规律研究[J]. *激光技术*, 2022, 46(6): 749–754.

4. 激光目标回波模拟器能量标定装置研究

引用本文: 孟庆安, 樊红英, 薛亮平, 等. 激光目标回波模拟器能量标定装置研究[J]. *激光技术*, 2022, 46(6): 802–807.

5. 基于不同阳光背景的激光告警概率曲线研究

引用本文: 梁巍巍, 谈蕊, 郭豪, 等. 基于不同阳光背景的激光告警概率曲线研究[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 830–833.

文章编号: 1001-3806(2023)05-0632-07

一种多波长多编码合束输出的新型激光源研究

郑雅文¹, 陈国胜², 陈文建¹, 胥浩¹, 李武森^{1*}

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094; 2. 北方信息控制研究院集团有限公司, 南京 211153)

摘要: 为了模拟复杂条件下的激光威胁源, 设计了一种基于多波长多编码合束输出的新型激光产生装置, 用于检测相应的激光告警设备。采用 3 路波长分别为 650 nm、808 nm 和 905 nm 的激光, 以 STC8H 单片机为核心构成编码模块, 输出调制后的编码激光, 通过二向色镜将 3 路激光光束合成一束出射, 进行了理论分析和实验验证。结果表明, 合束的脉冲激光能量最高达到 2.45 mJ, 光束直径为 6 mm, 频率调制精度达到 0.5 Hz, 占空比调制精度达到 0.1%; 该装置能够实现携带不同编码信息的、不同波长的激光合束出射。该研究为激光告警设备提供了一种新的检测装置, 对检测手段的改进有一定的参考意义。

关键词: 激光技术; 激光告警检测; 脉冲宽度调制; 激光编码; 多波长; 多编码; 二向色镜

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.05.009

Research on a new type of laser source with combined multi-wavelength and multi-coding beam output

ZHENG Yawen¹, CHEN Guosheng², CHEN Wenjian¹, XU Hao¹, LI Wusen¹

(1. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. North Information Control Research Academy Group Co. Ltd., Nanjing 211153, China)

Abstract: In order to simulate the laser threat in complicated condition, a new type of laser source with combined multi-wavelength and multi-coding beam out was presented. Three wavelengths of 650 nm, 808 nm and 905 nm were adopted here. The microcontroller STC8H was selected as core of the coding module to modulate laser beams. By dichroic mirrors, three channel lasers were combined to one channel laser output. And relevant theoretical analysis and simulation verification were carried out. The results show that the energy of pulse laser is up to 2.45 mJ, the diameter of beam is 6 mm. It can modulate laser driving signal in the precise frequency coding, the variational duty cycle coding and the variational space coding. The precision of frequency and duty cycle are 0.5 Hz and 0.1%. The device can provide laser beam with different coding messages in different wavelengths. This research presents a new detection device of laser warning devices, which has reference for the improvement of detection.

Key words: laser technique; laser warning devices test; pulse width modulation; laser coding; multi-wavelength; multi-coding; dichroic mirrors

引 言

激光告警设备用于对来袭激光威胁源的及时判别及预警。影响此类设备性能的是其对多波长和多编码激光信息的识别能力, 其检测设备需要尽可能准确、全面地模拟来袭激光的波长及其编码方式, 以准确反映激光告警设备的性能。

目前, 国内外针对激光告警检测设备的研究情况如下: 美国 TEXTRON 公司设计研发了飞行器保全系统集成测试仪 (integrated tester for aircraft survivability systems, ITASS), 装置能发射波长 905 nm、1550 nm 的激光对激光告警设备进行测试, 工作距离达 20 m。国内 HOU^[1] 采用多脉冲位置编码 (multi-pulse position modulation, MPPM), 设计的编码激光器实现 1064 nm 激光的 4 位编码输出, 脉冲输出能量达 12 mJ; CHEN^[2] 提出了一种基于现场可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 的多编码方式激光模拟源, 可以实现 5 种编码方式的输出, 平均误差达到 1 μ s 以下; CHEN 等人^[3] 提出一种多波长激光告警模拟检

作者简介: 郑雅文 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事光电检测技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: liwusen@njsut.edu.cn

收稿日期: 2022-08-23; 收到修改稿日期: 2022-11-17

测装置,基本实现了对多波长多编码激光源的模拟,但采用 5×1 光开关切换各激光器单独出射,效率较低且不能够模拟多波长合束出射时的激光源。

总之,目前的激光告警检测设备的编码激光较为单一,通常只带有一种编码方式,且波长单一,不能很好地体现错综复杂的环境。现有的激光告警检测领域需要有能够实现多种波长多种编码方式合一的综合检测用模拟激光源。

本文作者运用激光编码技术和激光合束技术,基于 STC8H 单片机的脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)信号输出功能,输出 3 种调制信号对激光器进行编码处理,同时基于二向色镜的滤波特性,使 3 束激光合束后输出。输出的激光束可以各携带 3 种不同的编码信息,3 种波长激光束可混合出射,也可单独出射。激光输出模式多样,满足不同检测需求,为激光告警检测设备的进一步改进提供更多的思路,在满足检测要求的基础上提高检测作业的工作效率。

1 系统总体方案

激光告警威胁源主要包括激光制导、激光测距、激光目标指示等^[4-6]。参考战场上现有的多种激光类应用,主要的激光参数有:波长、光功率、束散角等。目前常用的激光告警波长范围主要分布在近红外波段,包括 650 nm、780 nm、808 nm、1064 nm、1550 nm 等^[7]。

出射激光的光功率大小基于应用场景的不同有很大的差距,一般光功率都达到毫瓦量级,部分高功率激光应用能达到百瓦甚至千瓦级别^[8]。本装置拟采用毫瓦量级激光器,同时由于可以合束出射,在需要的时候可以实现更高的光功率输出。

激光束散角表征激光光束出射后的发散程度^[9],束散角过大会导致激光传输过程中的能量损耗增加,原则上应尽量控制激光束的束散角。

基于以上考虑,本文中选用的激光器波长分别为 650 nm、808 nm 及 905 nm,较好地覆盖常用的激光波段,光功率输出最大可达 150 mW,束散角最小可达 4 mrad,同时激光器带有 PWM 调制线,只需输入相应调制信号即可实现编码激光输出。

采用二向色镜作为合束元件,其基本原理是利用不同中心波长的激光入射二向色镜时反射率和透射率不同,将两束不同波长激光合为一束输出^[10]。本文中采用长波通型二向色分光滤光片,只需调整激光束 45° 入射镜面即可实现多束激光合束输出。

综合上述,本系统的总体方案如图 1 所示。

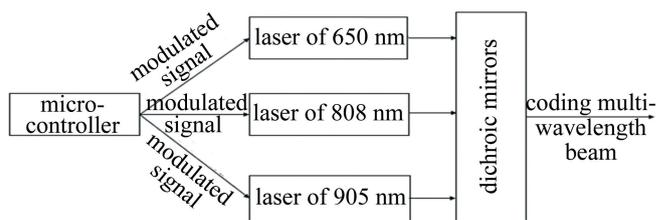


图 1 系统总体方案

Fig. 1 Overall system scheme

图 1 中,由单片机生成 3 路编码信号,驱动 3 路激光器输出带有编码信息的激光光束。3 路激光射入以二向色镜为核心激光合束光学系统,从而实现多波长编码的激光束输出。

2 关键技术设计

2.1 编码设计

本激光源预设的编码方式有 3 种,包括精确频率编码、变占空比编码以及变间隔编码,拟采用内调制的方式进行编码。内调制方式是指加载调制信号在激光振荡的过程中进行,即以调制信号变化规律去改变激光器的振荡参数,从而改变激光的输出特性^[11]。

2.1.1 精确频率编码 精确频率编码指设置固定的精确频率对激光脉冲进行调制,属于一种周期性编码^[12-14],主要是按照周期 T 来产生激光脉冲,并要求脉冲精度为固定值,同时要求系统同步精度也要固定不变。本设计拟实现 168 Hz 频率调制及 50% 占空比调制,其中由于激光器存在上升时间及下降时间,为使波形较为完整,需尽量增大周期,即频率选择最小。由于 STC8H 单片机 16 位高级 PWM 寄存器最高计数值 ρ_{\max} 可达到 65535,故其最低调制信号频率 f_{\min} 为:

$$f_{\min} = f_0 / \rho_{\max} \quad (1)$$

式中,单片机工作频率 $f_0 = 11.0592$ MHz,可得最低调制信号频率 $f_{\min} = 168$ Hz。脉冲示意图如图 2 所示。

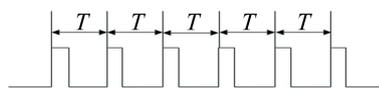


图 2 精确频率编码示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fine coding pulse

2.1.2 变占空比编码 常见的制导设备其激光脉冲占空比约为 1:1,即 50% 左右,而相同波长的激光测距仪占空比则小于此值^[15]。为更好地覆盖被测设备的应

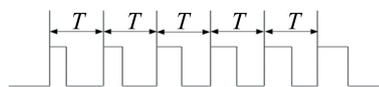


图 3 变占空比编码示意图

Fig. 3 Schematic diagram of variational space coding pulse

用范围,本文中设计的脉冲激光占空比可以从 10% ~ 50%连续变化,其示意图如图 3 所示。

2.1.3 变间隔编码 变间隔编码由精确频率编码发展而来,主要是调制编码周期使其规律性变化。比如编码波形输出循环的大周期为 T ,一个大周期 T 包含多个小周期 t ,可任意设置小周期的间隔以及个数,大周期由小周期及其个数决定^[16],其中周期数及大周期值可根据实际要求设置,本文中实现了 50 个小周期的编码输出,其示意图如图 4 所示。

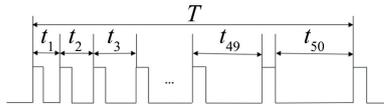


图 4 变间隔编码示意图

Fig. 4 Schematic diagram of variational duty coding pulse

2.2 电子系统设计

2.2.1 硬件 电子系统的构成如图 5 所示。其中上位机用于提供人机界面以控制激光编码类型以及各项参数的设置,W5500 网络通信模块用于实现上位机与单片机之间的通讯,STC8H 单片机用于实现各种模式的编码,其内部的高级 PWM 模块包括 PWM 1 和 PWM 2 两组高级 PWM,各有 4 个通道,每个通道均可独立输

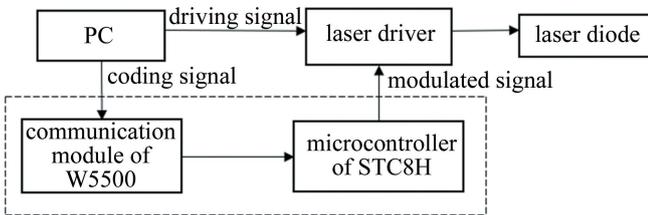


图 5 电子系统构成框图

Fig. 5 Block diagram of electronic systems

出。激光驱动模块接收由上位机发送的驱动信号及单片机编码模块发送的调制电信号,驱动激光二极管 (laser diode, LD) 产生编码激光光束。

2.2.2 单片机控制软件 本文中为基于 PWM 调制的编码系统,主要通过 STC8H 单片机的 16 位高级 PWM 模块实现。

当上位机发送编码类型为精确编码时,自动重载寄存器 (auto reload register, ARR) 写入周期值,捕获/比较寄存器 (capture/compare register, CCR) 写入占空比值,计数器频率由分频后的主时钟源决定,本编码软件分频系数设为 1。计数器设定为向上计数,即从 0 开始计数,计数至重载值时计数溢出,进入下一周期。设定 PWM 1 模式,即计数值小于 CCR 的内容时,输出高电平,计数值大于 CCR 的内容时,输出低电平。

当编码类型为变占空比编码时,ARR 写入预设的周期值,CCR 写入起始占空比值,输出一个周期后产生更新中断,中断程序中由正弦函数数值表提供读表数据,首先判断读表指针是否大于表格数据个数即数值点数,未大于数值点数则根据读表指针将数值表数据写入 CCR,指针+1;若大于数值点数则指针清零,完成一个周期的占空比调制。

当编码类型为变间隔编码时,ARR 写入起始周期值,CCR 写入预设占空比,输出一个周期后产生更新中断,将读表数据写入 ARR,完整读完一个正弦函数数值表即输出一个大周期,数值点数代表小周期个数。

程序流程图如图 6 所示。图中,IER (interrupt enable register) 是中断使能寄存器。

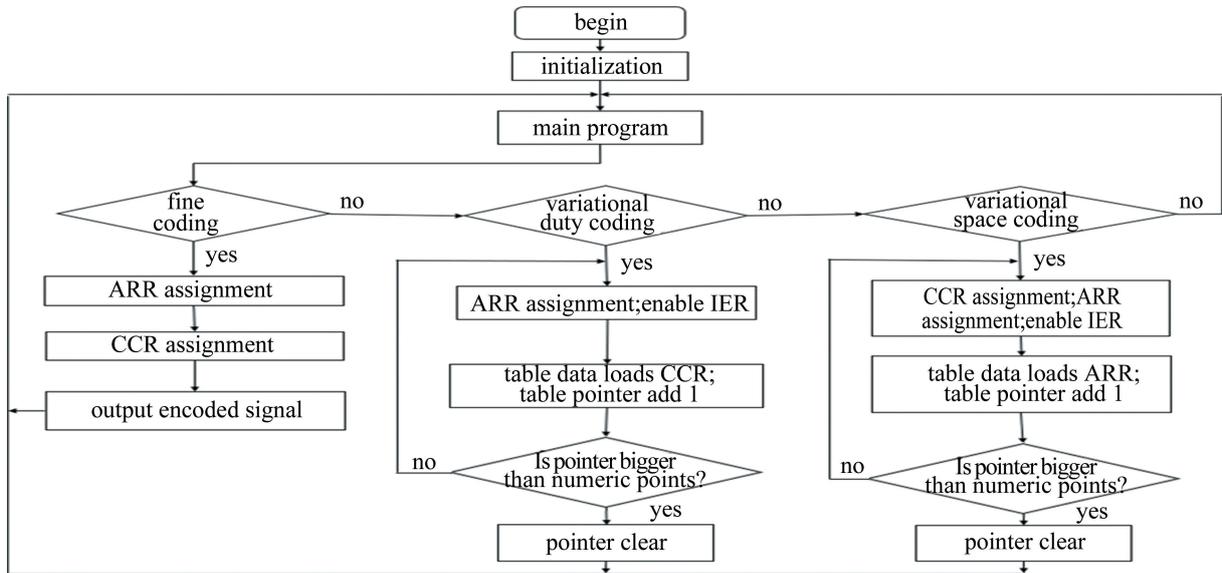


图 6 软件流程图

Fig. 6 Flow chart of software

2.3 激光器驱动及调制设计

本装置采用半导体激光器输出激光。由于半导体激光器是以载流子直接注入而工作的,对驱动电流的稳定性有较高的要求,故需要以恒电流驱动。同时需要设置相应的电流缓冲模块,以消除电路中可能存在的浪涌,防止浪涌现象烧坏 LD。

恒电流输出一般采用负反馈的控制方法,恒流驱动电路原理如图 7 所示。包括调制信号输入电路、电压-电流转换电路、恒流输出电路及反馈电路。电路中,运算放大器 A_1 起比较器作用。运算放大器 A_2 与电阻 R_4 、 R_5 构成同相比例运放,可通过调节电阻 R_4 与 R_5 的阻值来控制取样电压 V_{R_3} 的放大倍数。电阻 R_2 与电容 C_2 组成运算放大器 A_1 的输出缓冲模块,以防上电瞬间的产生浪涌冲击 LD。

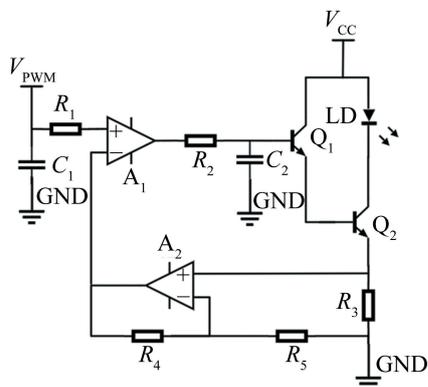


图 7 驱动电路示意图

Fig. 7 Schematic diagram of driving circuit

PWM 调制信号输入时,单片机高电平信号电压 $V_{P_{PWM}}$ 经过由电阻 R_1 与电容 C_1 组成的 1 阶低通滤波器,滤波后进入运放 A_1 的同相输入端,将运放 A_2 放大后的取样电压 V_{R_3} 与高电平信号电压 $V_{P_{PWM}}$ 进行比较,当 V_{R_3} 大于同相端电压时,运放 A_1 输出负电压,三极管 Q_1 截止,LD 电流减小,从而导致取样电压 V_{R_3} 减小。当取样电压 V_{R_3} 减小到低于同相端电压时,运放 A_1 输出正电压,三极管 Q_1 导通,则 LD 电流重新增大。因此整个闭环反馈电流处于动态平衡的状态,保持 LD 的恒电流驱动,同时实现 PWM 的电路开关调制。

本装置采用的 3 种波长的 LD 型号为 HGLD-650T05、HGLD-808T05、HGLD-905T05。由于不同波长 LD 阈值电流及工作电流不同,需针对不同 LD 设置不同取样电阻。基于同相比例运放电路,取样电阻 R_3 上的电压 $V_{R_3} = V_{P_{PWM}}$,则计算公式^[17]为:

$$I_{LD} = \frac{V_{P_{PWM}}}{R_3} \quad (2)$$

式中, I_{LD} 为 LD 驱动电流值; $V_{P_{PWM}}$ 为单片机高电平电压值; R_3 为取样电阻阻值。

为验证电路可行性,将 650 nm 型号 LD 接入驱动电路,其阈值电流为 30 mA,150 mW 输出时工作电流为 50 mA,相关参数设置为:供电电压 $V_{CC} = 5$ V,单片机高电平信号电压 $V_{P_{PWM}} \approx 4$ V,则取样电阻 $R_3 = 80 \Omega$ 。得到的激光波形图如图 8 所示,其输出特性基本满足实验需求。

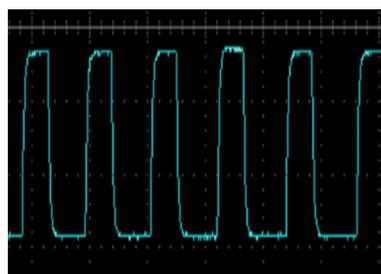


图 8 测试激光波形图

Fig. 8 Waveform of testing laser

2.4 光学系统设计

本设计中利用二向色镜的截止滤光特性,将符合反射波段的激光束与符合透射波段的激光束合为一束激光后出射。二向色镜对比其它合束方式,其实现方式简单,抗颠簸能力强,易于调校,合束效率高,适用于野外测量^[18],较好满足激光告警实际装备的测量要求。

光路示意图如图 9 所示。

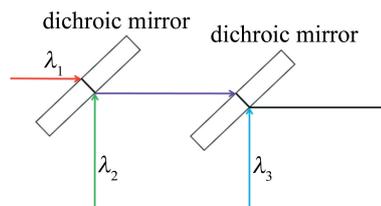


图 9 二向色镜合束示意图

Fig. 9 Diagram of dichroic mirror combining

二向色镜根据各合束激光的波段进行参数设计,根据各合束激光的要求,选用的二向色分光滤光片,其型号为 HGMP-750 及 HGMP-850。为了解二向色镜对各波段的透过率特性,提供二向色镜的产品测试数据曲线,如图 10 所示。由图 10a 可以看到, HGMP-850 型二向色镜对 905 nm 波长的激光透过率约为 95%,对 808 nm 波长激光透过率约为 5%。图 10b 中的 HGMP-750 型二向色镜对 808 nm 激光透过率约为 92%,905 nm 激光透过率也约为 92%,对 650 nm 激光透过率接近 1%。故 HGMP-850 型二向色镜能实现透射 905 nm 激光束,反射 808 nm 激光束。HGMP-750

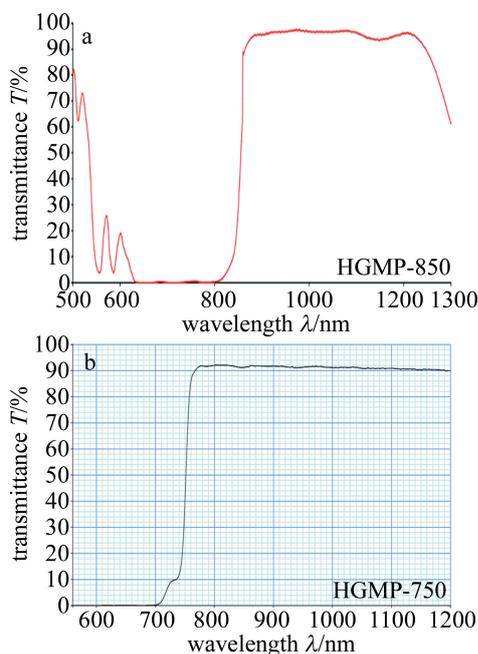


图10 二向色镜曲线图

Fig. 10 Graph of dichroic mirrors

型二向色镜能实现透射 808 nm、905 nm 激光束,反射 650 nm 激光束。

3 结果与分析

3.1 激光合束实验

出射激光的光束质量测试指标包括激光能量,合束光束束散角和合束光斑重合度。本文中选用的激光器为脉冲激光,激光器能量公式^[19]为:

$$P_{\text{avg}} = Qf_{\text{req}} \quad (3)$$

式中, P_{avg} 为脉冲激光平均功率; Q 为单脉冲能量; f_{req} 为脉冲重复频率。所选激光器平均功率为 150 mW,调制后的激光器脉冲重复频率为 168 Hz,故由理论推算单路激光脉冲能量约为 0.89 mJ,则合束激光脉冲能量为 2.67 mJ。用激光能量计测量 3 路激光独立出射的激光能量以及通过合束光路后的激光能量,其数据如表 1 所示。

由表 1 可知,合束光路的激光能量损失率约为 20%,合束后单脉冲激光能量约为 2.45 mJ,与理论值误差约为 8%,并且激光器输出激光能量会略大于理论值,这是因为激光能量输出还与供电电压相关,故实际输出激光能量与理论值有一定出入,但基本符合系统设计的要求。

合束光斑重合度与光束束散角的检测可采用离轴抛物面反射式平行光管装置,其特性是可以将焦点处的光源模拟至无穷远处出射,利用其光路及逆光路可

表 1 激光能量测试实验结果

Table 1 Result of laser energy testing

number of detections	pulse laser energy of 650 nm /mJ	pulse laser energy of 808 nm /mJ	pulse laser energy of 905 nm /mJ	pulse laser energy of combined laser beam/mJ
1	1.19	0.81	1.09	2.37
2	1.10	0.82	1.14	2.46
3	1.17	0.80	1.10	2.51
4	1.11	0.83	1.12	2.45
5	1.14	0.80	1.11	2.38
6	1.09	0.85	1.12	2.44
7	1.17	0.83	1.08	2.52
8	1.15	0.82	1.11	2.39

分别检测合束光斑重合度及光束束散角。

激光束散角测量采用透镜聚焦法^[20],即使用聚焦透镜对合束激光进行聚焦,测量在焦面上的光斑直径,然后再由束散角测量公式计算出束散角。实验装置中平行光管起聚焦元件的作用,束散角测量公式有:

$$\tan\theta = d/f' \quad (4)$$

式中,离轴抛物面反射镜焦距 $f' = 800$ mm;10 次测量后获得的平均光斑直径为 $d = 3.42$ mm。由计算可知,激光束散角 $\theta = 4.27$ mrad,符合设计要求。

可采用离轴抛物面反射式平行光管装置的逆光路测量合束光束重合度,实现方法是将激光器置于系统焦面处,在系统出射端模拟激光器无穷处照射效果,以 905 nm 激光束作为基准光束,根据其它子激光束形成的光斑位置与 905 nm 激光光束的偏差来确定合束重合度^[21]。其中实验用激光模组出射激光光束直径为 6 mm,为保证多束激光的重合度,将在平行光管后的靶纸上预置一个直径为 6 mm 的圆形区域,调整合束激光限制在这个圆形区域内即同轴调整完成。

3.2 激光编码验证实验

采用示波器来探测激光编码后的波形,实验装置如图 11 所示。从左到右分别为光电探测器、衰减片及激光器。



图 11 编码波形探测的实验装置

Fig. 11 Setup of the encoded waveform detection

将调制电信号接入激光模组,查询光电探测器说明书可知,其能接收的饱和光功率为 5 mW,故采用衰

减片将 150 mW 光功率的激光光束衰减至 2%, 即 3 mW 的光功率后照射探测器感光面, 光电探测器的输出接入示波器通道得到脉冲激光波形。实验结果如图 12 所示, 3 个小图中, 上列波形为编码模块输出的调制电信号波形, 下列波形为激光信号波形。

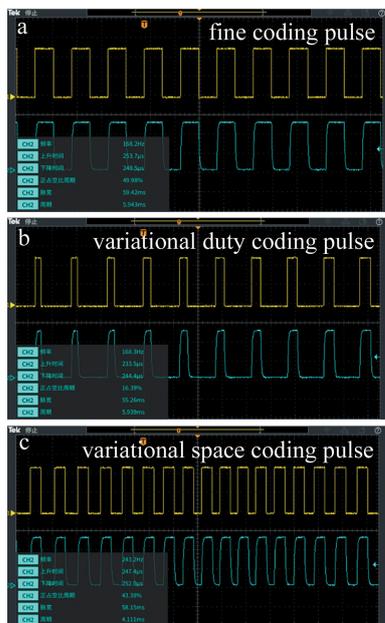


图 12 脉冲激光编码波形

Fig. 12 Waveform of coding pulse laser

图 12a 中精确频率编码的频率为 168 Hz, 占空比为 50%, 其中占空比调制精度为 0.1%, 周期调制精度为 0.5 μ s; 图 12b 中变占空比编码中占空比变化范围为 10%~50%; 图 12c 中变间隔编码频率变化范围为 168 Hz~337 Hz, 共有 50 个小周期, 每个周期频率平均相差 10 Hz, 一个大周期为 150 ms, 激光器脉冲上升时间及下降时间约为 250 μ s, 其中占空比精度为 0.1%, 频率精度为 0.5 Hz。实现了较好的激光编码效果。

4 结论

设计了一种新型的激光告警模块检测光源, 较好地实现了多波长编码和多光束合束的功能以及相应的指标。本文作者设计了用于激光告警接收设备的检测装置, 能基本满足常见激光威胁源的参数指标, 使得激光告警设备的测试更加全面和准确。

参 考 文 献

[1] HOU Z F. Research on repetition frequency coding laser system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011: 78-84 (in Chinese).
侯作风. 重复频率编码激光器系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011: 78-84.

[2] CHEN H. Design of high complexity laser pulse encoder based on FP-

GA[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018: 32-46 (in Chinese).

陈慧. 基于 FPGA 的高复杂度激光脉冲编码器设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2018: 32-46.

- [3] CHEN Zh B, WANG W M, MA D X, *et al.* The simulation detection device of laser warning equipment with simulation detection methods: CN103018009B [P]. 2015-08-19 (in Chinese).
陈志斌, 王伟明, 马东玺, 等. 激光告警设备模拟检测装置及模拟检测方法: CN103018009B [P]. 2015-08-19.
- [4] WANG G Ch, SUN B, WAN Q, *et al.* A Survey of military pulsed laser rangefinding technology[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2003, 1(4): 55-59 (in Chinese).
王古常, 孙斌, 万强, 等. 军用脉冲激光测距技术与研究现状[J]. 光学与光电技术, 2003, 1(4): 55-59.
- [5] GAN Y L, LI Ch R. Development of laser alarm and laser interference technology[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(12): 15-19 (in Chinese).
涂元柳, 李朝荣. 激光告警与激光干扰技术的发展[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(12): 15-19.
- [6] ZHANG F, REN H J. Status and development trend of laser surveillance and warning technology[J]. Modern Information Technology, 2019, 3(10): 44-46 (in Chinese).
张方, 任华军. 激光侦察告警技术现状与发展趋势[J]. 现代信息科技, 2019, 3(10): 44-46.
- [7] JAN P. Laser warning receivers[J]. Proceedings of the SPIE, 2003, 5229: 318-322.
- [8] QU Zh, LIU Y, LIU B. High power semiconductor laser and its applications in military[J]. Ome Information, 2006, 23(2): 52-55 (in Chinese).
曲宙, 刘洋, 刘博. 大功率半导体激光器的军事应用[J]. 光机电信息, 2006, 23(2): 52-55.
- [9] WU H P. Evaluation and analysis of the beam quality[J]. Optics & Laser Technology, 2000, 17(4): 128-132.
- [10] ZHENG Y, HE M, LIU X X, *et al.* Experimental study on high power laser beam combining by dichroic mirrors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(15): 1514002 (in Chinese).
郑也, 何苗, 刘小溪, 等. 基于二向色镜的高功率激光组束实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(15): 1514002.
- [11] HU Y, XIAO J, ZHANG Y N. Design of hyperspectral data visualization mining system based on laser internal modulation technology[J]. Laser Journal, 2020, 41(10): 167-171 (in Chinese).
胡洋, 肖剑, 张娅妮. 基于激光内调制技术的高光谱数据可视化挖掘系统设计[J]. 激光杂志, 2020, 41(10): 167-171.
- [12] WEI W J, QIN Sh Q, ZHAN D J, *et al.* Research on laser encoding in laser semi-active homing guidance[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(12): 1199-1203 (in Chinese).
魏文俭, 秦石乔, 战德军, 等. 激光半主动寻的制导激光编码的研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(12): 1199-1203.
- [13] LUO W, DONG W F, YANG H B, *et al.* Research on an arbitrary pulse interval and pulse width coding laser guidance signal simulator[J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2019, 33(6): 416-419 (in Chinese).
罗威, 董文锋, 杨华兵, 等. 任意脉冲间隔和脉冲宽度编码激光制导信号模拟源设计[J]. 空军预警学院学报, 2019, 33(6): 416-419.
- [14] TONG Zh Ch. Research on working period identification of laser

- guided signal code[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2018, 33(6):49-51 (in Chinese).
- 童忠诚. 周期型激光编码工作周期识别技术研究[J]. *光电技术应用*, 2018, 33(6):49-51.
- [15] CHEN Zh B, LIU B H, XUE M X, *et al.* Driving technology for pulsed laser simulator with adjustable frequency and duty cycle[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(1):191-196(in Chinese).
- 陈志斌, 刘宝华, 薛明晰, 等. 频率占空比易调的模拟脉冲激光驱动技术研究[J]. *应用光学*, 2012, 33(1):191-196.
- [16] LIU T X, WANG W G. Realization of new high precision coding for laser pulse[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2014, 28(4):402-408(in Chinese).
- 刘廷霞, 王伟国. 新型高精度激光脉冲编码的实现[J]. *电子测量与仪器学报*, 2014, 28(4):402-408.
- [17] WEI M L, YANG M, XIAO J, *et al.* Frequency modulation system for vehicle-mounted frequency-modulated continuous wave measurement[J]. *Journal of CAEIT*, 2020, 15(11):1037-1041 (in Chinese).
- 韦美丽, 杨墨, 肖经, 等. 基于车载调频连续波测距的激光调制系统设计[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2020, 15(11):1037-1041.
- [18] WANG M, WANG Q, ZHU R H, *et al.* Simulation of reflectivity and combining efficiency of dichroic mirrors for spectral beam combining[J]. *Laser Technology*, 2019, 43(3):421-426 (in Chinese).
- 王敏, 王青, 朱日宏, 等. 光谱合束二向色镜反射率及合束效率仿真研究[J]. *激光技术*, 2019, 43(3):421-426.
- [19] MIAO X Y, PENG X, LU W T, *et al.* Experimental study of the energy measurement of pulse laser with a calorimetric laser power meter[J]. *College Physics*, 2020, 39(12):32-35(in Chinese).
- 苗昕扬, 彭雪, 路婉婷, 等. 利用量热型激光功率计测量脉冲激光能量的实验研究[J]. *大学物理*, 2020, 39(12):32-35.
- [20] LIU B. Military strong laser beam parameters test research of divergence angle and energy density[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012:65-85 (in Chinese).
- 刘冰. 军用强激光器束散角和能量密度参数测试研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012:65-85.
- [21] CHEN Ch B. Design of beam monitoring device in multi-wavelength laser beam combining system[D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2020:55-74(in Chinese).
- 陈昌博. 多波长激光合束系统中光束监测装置的设计[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020:55-74.