

基于声光调制的中波红外激光功率稳定系统

高 苗¹, 邵晓鹏¹, 王 琳¹, 史学舜², 孙昊洋¹, 丁钟奎¹, 孙华梁¹, 张彦杰¹, 刘玉龙²

(1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

摘 要: 针对中波红外激光器输出功率波动较大, 采用声光反馈调节的方法, 研发出一套声光反馈调节中波红外激光器腔体外功率的稳定控制系统, 系统主要由声光调制器、探测器、微电流放大器、反馈控制电路等组成。经实验验证, 该系统有效地抑制了激光器输出功率的波动, 波动可控制在 $\pm 0.08\%$ 范围之内, 达到了低温绝对辐射计对输入激光稳定性的要求。同时该系统具有软件调节输出功率的功能, 能够便捷、低成本地实现激光器多种不同功率的连续可调性输出, 通过增量式 PID 算法使得系统在 2s 内便可完成不同功率之间的调节, 亦解决了以往一台激光器只有唯一的输出功率的局限问题, 满足用户的多种使用需求, 具有实用性、创新性。

关键词: 功率稳定性; 中红外激光; 声光调制; 反馈控制

中图分类号: TN242 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)07-1975-05

Power stabilization system of medium wave infrared laser based on acousto-optic modulator

Gao Miao¹, Shao Xiaopeng¹, Wang Lin¹, Shi Xueshun², Sun Haoyang¹, Ding Zhongkui¹, Sun Hualiang¹, Zhang Yanjie¹, Liu Yulong²

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

2. The 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266555, China)

Abstract: To suppress the fluctuation of medium wave infrared laser output power, a kind of power stabilization system was developed by the method of acousto-optic feedback, which consists of acousto-optic modulator, detector, micro-current amplifier and feedback control circuit. According to the experimental results, this system has the ability to suppress the power fluctuation in the range of $\pm 0.08\%$ and to meet the stable output power requirement of cryogenic radiometer. Different mode can be set easily in software to obtain the different output power of the laser, and the adjust progress will be finished within 2 s by using the incremental PID control algorithm. This function gives users great convenience and solves the problem that one laser can only supply one output power. This system has the advantage of good practicability and innovation.

Key words: power stabilization; mid-infrared laser; acousto-optic modulator; feedback control

收稿日期: 2014-11-12; 修订日期: 2014-12-10

作者简介: 高苗(1989-), 男, 硕士生, 主要从事激光器功率稳定的研究。Email: one1989a@163.com

导师简介: 邵晓鹏(1973-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事图像处理方面的研究。Email: xpshao@xidian.edu.cn

0 引言

红外辐射是物质表现红外特性的基本载体,而处在大气红外窗口的 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段激光,在军事上和激光通讯上都有非常重要的应用^[1-2]。在光谱分析应用中,红外辐射定标是客观评价红外光谱测量仪器及相关器件的重要手段,是红外信息量化的关键技术之一^[3-5]。

低温绝对辐射计是实现红外信息量化的核心,其工作原理为光电替代法。低温绝对辐射计的探测面是一层吸收比很高的黑色物质,接受光辐射后会产生温升,当温度稳态后会对应确定的光功率。因此,为了能让低温绝对辐射计有稳态的温升,要求输入的光功率越稳定越好。基于这一应用需求文中研发了一套中波红外激光器腔体外功率稳定系统,能够使激光功率的稳定性在 1 h 内维持在 $\pm 0.08\%$ 范围内。目前,国内外对激光功率的稳定研究多集中在可见波段,尚未发现有对中波红外的激光功率稳定的相关研究。中波红外激光器功率稳定的方法与可见光的相类似,但由于其波段的特殊性,需要特定的光学器件、功率探测器和光路调整方法,整体技术难度较可见光的要大。文中的研究符合实际应用需求且具有一定的创新性,符合中波红外技术发展的趋势。

1 系统的构成及工作原理

1.1 系统概述

如图 1 所示,文中所使用的功率稳定控制系统是处于激光器与低温绝对辐射计之间用以对激光器腔外输出功率进行稳定的部分。该系统由光学模块、光电转换模块及反馈控制模块等三大模块所构成。激光器输出的激光进入光学模块,经过声光调制器(AOM)后被分为 0 级光和 1 级光,1 级光被光阑滤除,0 级光再经红外分束器一部分透射输出供低温绝对辐射计使用,剩余的反射输出进入光电转换模块,将这部分激光信号转换为电压信号后,发送到反馈控制模块,反馈控制模块根据接收到的电压信号计算出控制信号,并将该控制信号加在声光调制器上实现功率稳定调制。

实验中使用波长为 $3.39\ \mu\text{m}$ 、功率为 $22.5\ \text{mW}$ 连

续输出的线偏振激光器作为被控对象;同时使用六位半数字万用表对经过微电流放大器放大后的实时功率信号进行采集并通过上位机存储,以供实验分析使用。

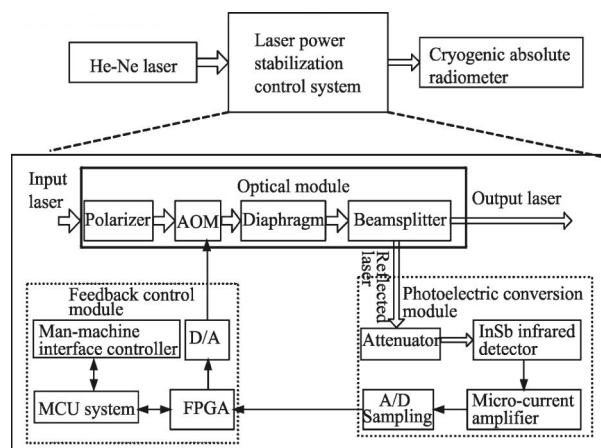


图 1 激光功率稳定系统结构

Fig.1 Structure of laser power stabilization system

1.2 系统中的主要器件及算法的选取

1.2.1 声光调制器的选取

当外加调制信号通过驱动电源作用到声光器件时,声光器件产生超声波的强度随此信号变化,衍射光强也随之变化,从而实现了对激光的强度调制。结合实验需求,搭配声光驱动器对声光晶体使用模拟信号进行调制,根据反馈控制电路传递的电压信号实时调节输出光功率,达到减小功率波动的目的。通过声光调制与反馈控制电路模块的配合,使调节过程灵活性强,实时性好,稳定度高。

1.2.2 激光功率探测器的选取

激光功率探测器将接收到的激光功率信号实时地转换为对应的电流信号,是该系统中最为重要的环节,其探测性能决定着整个系统最终所能达到的稳定精度。InSb 探测器响应波长范围为 $1\sim 5.5\ \mu\text{m}$,具有受外界干扰小、输出信号强等优点,符合中红外激光工作条件,因此被该系统所选用。

1.2.3 反馈控制部分的选取

反馈控制部分主要包括数据采集控制电路和反馈控制算法这两个部分。

(1) 数据采集控制电路

① FPGA 控制 ADC 将激光实时功率所对应的电压模拟信号转换为数字信号。

② FPGA 将此实时功率所对应的数字信号进行分析计算处理后,发出相应的功率调制数字信号,通过 DAC 将该数字电压信号转换为模拟电压信号,将该模拟电压信号连接到声光调制器调节激光输出功率。

具体设计与结构连接如下图 2 所示。

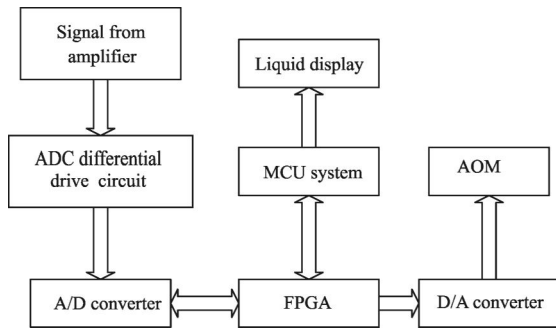


图 2 数据采集控制流程

Fig.2 Progress of data acquisition and control

(2) 反馈控制的数据处理算法

目前,PID 控制器在工业生产过程中占了 90% 以上的份额,其具有原理简单、易于实现、适用面广、控制参数相互独立、参数的选定比较简单等优点^[5]。该系统中选用增量式 PID 作为反馈控制算法,增量式 PID 控制器不仅继承了传统 PID 控制器的优点,还克服了传统 PID 控制器抗干扰能力差、计算繁琐、容易造成误差叠加等缺点^[6]。

1.3 系统工作原理

激光器输出功率波动较大的线偏振激光信号,经过起偏器进一步纯化激光偏振方向后,进入声光调制器发生布拉格衍射,声光调制器根据施加的不同驱动电压信号输出不同功率比重的 0 级与 1 级激光信号。使用光阑将 1 级光滤除,该系统只使用 0 级光。经过红外分束器后将 0 级光的一部分透射输出而剩余部分反射输出。透射输出的激光进入低温绝对辐射计作定标使用,反射输出的激光经过衰减片后,激光功率衰减到 InSb 探测器最大允许入射功率以下,然后进入 InSb 探测器做反馈控制使用。

反馈控制的工作原理为:进入 InSb 探测器的激光信号转化为相应的电流信号;再经过微电流放大器将此电流信号转换为对应的电压信号;此电压信号被反馈控制系统所采集,并与设定功率所对应的电压信号比较得到偏差信号;利用该偏差信号再运

用 PID 控制算法得到实时的声光调制器驱动控制电压信号;声光调制器依据此驱动控制电压信号实时调制 0 级光功率在总功率中所占的比重,从而抑制了声光调制器之后的光路中的 0 级光功率的波动。最终实现了系统所使用的 0 级光功率稳定的目标。

在这个实验中,保持低温绝对辐射计探测到的光功率和 InSb 探测器产生的电流信号之间的比例关系恒定是实现激光输出功率稳定的必要保证。因为,InSb 探测器产生的电流信号在反馈环内,是实际被稳定的量,而真正需要稳定的低温绝对辐射计探测到的光功率却是在反馈环外。

要保持二者的比例关系恒定,首先,要求红外分束器的分光比例恒定;其次,要求红外功率探测器光电转换系数恒定^[7]。因此,在系统中增加偏振片以消除激光偏振方向对分束器的分光比例的影响,从而实现分光比例恒定的目标;同时选用较大光敏面积的 InSb 探测器,尽量使激光光斑全部落在 InSb 探测器光敏面内,减少由于激光光斑能量分布变化带来的误差。

2 实验数据分析

实验使用与反射路同型号的 InSb 探测器作输出路功率稳定性的评价判断。以下实验数据均为使用六位半数字万用表采集得到,其数据为 InSb 探测器的输出经微电流放大器后的电压信号,并将数据存储在在与万用表连接的上位机中,其采样间隔为 1.2 s。实验数据主要包括:激光器不加反馈控制时的输出功率对应的电压值、加反馈控制后反射路(即反馈控制路)的输出功率值对应的电压值、加反馈控制后透射路(即实际使用输出路)的输出功率值对应的电压值。为了保证实验数据的真实有效性,以下分析均使用实验中直接得到的电压值,而非经过转换对应的功率值。计算公式如下:

功率值 $P(mw)$ 与电压值 $U(v)$ 的对应转换公式为:

$$P = \frac{U}{27} (mw) \quad (5)$$

稳定性评价采用计算公式为:

$$S = \pm \frac{MAX - MIN}{MAX + MIN} \times 100\% \quad (6)$$

2.1 激光器不加控制时的输出功率分析

由图 3 可见,激光器不加反馈控制时其输出的

激光功率波动很大,1 h 内的稳定性只有 $\pm 10\%$ 左右;即使是相对稳定的时段内,其 30 min 内的稳定性也只有 $\pm 4\%$ 左右。像这样功率波动较大的激光是无法满足低温绝对辐射计的使用要求的。

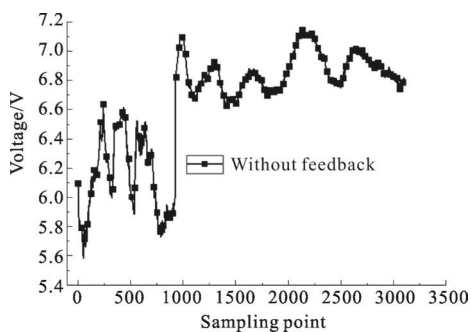


图 3 激光器不加反馈控制时输出功率曲线

Fig.3 Output power of laser without feedback control

2.2 激光器加控制后反射路的输出功率分析

图 4 中黑色正三角形标示的曲线为激光器刚启动的前 35 min 内的反射路输出功率曲线,可见在前 25 min(前 1 250 个采样点)内反射路功率相对波动为 $\pm 0.14\%$,而之后的 10 min 一直保持在 $\pm 0.04\%$ 以内,说明在激光器刚启动前 25 min 内的控制效果不佳,不宜使用。一般在实验时,要先让激光器启动预热 30 min 以上。图 4 中白色倒三角形标示的曲线为激光器启动预热 30 min 后的反射路输出功率曲线。在第 3 281 采样点处(65 min 处)有较大跳变,从第 3 280 采样点处的 3.605 V 变化到了 3.595 V,下降了 10 mV,相对跳变了 0.278%,出现跳变的原因是激光器输出功率在该时刻有较大波动,从而在探测器接受到了一个跳变信号,探测到的信号给到反馈控制电路,经

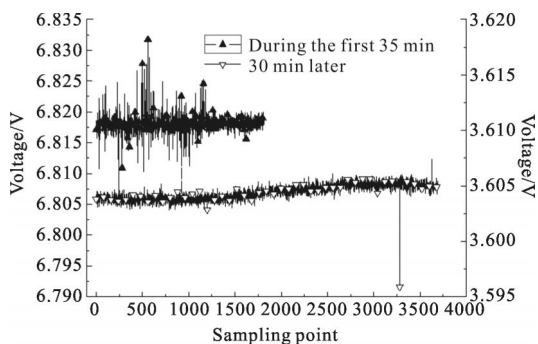


图 4 激光器刚启动 35 min 及启动 30 min 后加反馈控制反射路输出功率曲线

Fig.4 Output power of reflected laser with feedback control during the first 35 min and 30 min later after opening laser

过 PID 算法给出声光调制器驱动电压值,实现功率稳定调制,在第 3 282 采样点处已经调制完成恢复到了期望稳定到功率值处(3.604 V)。这也说明,声光调制器调制速度快,在出现较大功率跳变时,反馈控制系统可以在两个采用点间隔时间(1.2 s)内完成稳定调制。在 InSb 探测器正常工作的时间内,激光器反馈控制路稳定精度一直维持在 $\pm 0.04\%$ 以内,30 min 内精度更是可以达到 $\pm 0.02\%$ 。

2.3 激光器加控制后透射路的输出功率分析

图 5 中 without feedback 标示的曲线为激光器不加反馈控制时的输出功率信号曲线,power 1、2、3 标示的曲线为通过软件设定的不同稳定输出功率值的曲线。图 5 中不加反馈控制时在 1 h 内最大 7.145 V 到最小 5.585 V 波动值为 1.560 V,相对波动高达 $\pm 12.25\%$ 。选择将图 5 中 power 1 与 power 3 曲线放大显示在图 6 中。

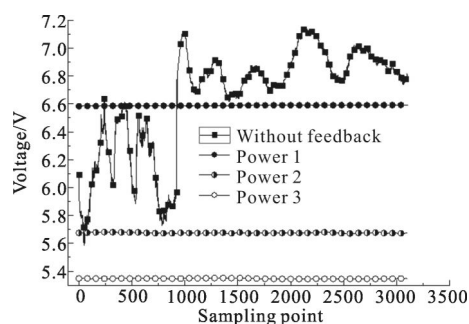


图 5 激光器不加反馈控制与加反馈控制后设定不同输出功率值

Fig.5 Output power of laser without/with feedback control

图 6 中黑色圆形标示的曲线为激光器加反馈控制 power 1 的输出功率信号曲线,在 1 h 内最大 6.592 V 到最小 6.584 V,波动值只有不到 9 mV,相对波动只有 $\pm 0.07\%$;30 min 内相对波动可以达

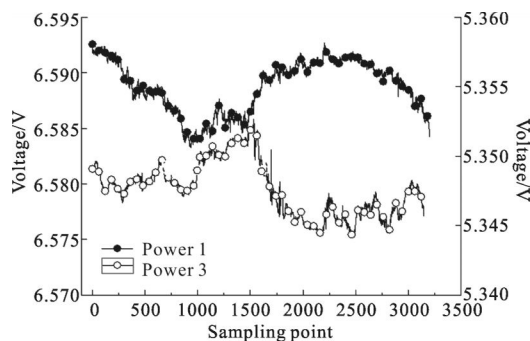


图 6 图 5 中 power 1 与 power 3 坐标放大后曲线

Fig.6 Enlarge curve of power 1 and power 3 in the Fig.5

到 $\pm 0.04\%$ 。图7中白色圆形标示的曲线为激光器加反馈控制 power2 的输出功率信号曲线,在1 h内最大5.352 V到最小5.344 V,波动值为8 mV,相对波动只有不到 $\pm 0.08\%$;30 min内相对波动为 $\pm 0.04\%$ 。

由此可见,在声光反馈控制下激光器输出功率的波动得到了明显的抑制,且能够调节激光器输出不同的稳定功率。

2.4 激光器加控制后反射路与透射路的输出功率对比分析

图4中反射路的激光属于反馈控制环,其控制功率的稳定性决定着反馈控制环外透射路的激光功率稳定性。以上实验分析表明:1 h内反射路的激光功率稳定性达到了 $\pm 0.04\%$,而透射路达到了 $\pm 0.08\%$ 。透射路的功率稳定性比较低的原因在于进入透射路 InSb 探测器的激光功率的波动为 $\pm 0.04\%$,即反射路所能控制达到的稳定精度,另外还有环境带来的误差,而且 InSb 探测器自身有一定的探测误差。激光功率的波动,再加上环境误差及 InSb 探测器的探测误差,相叠加表现在透射路的激光功率稳定性上。因此提高反馈路的激光功率稳定性,减小环境误差,提高 InSb 探测器的探测精度,是改善输出路激光功率稳定性的有效办法。

3 结 论

实验表明:使用声光调制器调节激光0级光与1级光之间输出功率的比例的方法可以大幅度地提高0级光功率的稳定性。实现了30 min功率稳定性优于 $\pm 0.04\%$,1 h功率稳定性优于 $\pm 0.08\%$ 的中波红外激光输出。由此可见,该系统使中波红外激光输出功率的稳定性提高了2个数量级。稳定后的激光可以供低温绝对辐射计工作使用,解决了中波红外激光器输出功率稳定性差,无法直接使用的难题。同时通过软件可以设定不同的激光输出功率,在设定完新的输出功率后2 s内便可获得新的功率稳定的激光输出。这种使用软件设置来更改输出功率的方法,解决了以往一台激光器只有唯一的输出功率的局限,实现了在一定范围内连续可调的激光功率输出,无需调整光路,方便快捷,使得该系统能够满足不同用户的不同使用需求,具有实用性、创新性。另外该系统所使用的功率稳定方法具有一定的普遍适用性,

各种波长不同功率的激光腔体外输出功率稳定控制系统均可使用。

参考文献:

- [1] Guo Ruhai, Chen Ning, Wang Bing, et al. Monitoring and alignment system for mid-infrared solid-state laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3185-3189. (in Chinese)
郭汝海,陈宁,王兵,等.中波红外固体激光器的指向监视系统[J].*红外与激光工程*, 2013, 42(12): 3185-3189.
- [2] Wang Tiejun. Studies on mid-infrared tunable lasers [D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
王铁军.中红外可调谐激光技术的研究[D].长春:吉林大学,2007.
- [3] Zhang Lei, Han Yusheng, Wang Feng. Study on the infrared standard transfer detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(z1): 156-158. (in Chinese)
张磊,韩裕生,王峰.红外标准传递探测器研究[J].*红外与激光工程*, 2007, 36(z1): 156-158.
- [4] Zhang Dongyan, Wang Rongrui. Progress on mid-infrared lasers[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(5): 487-491. (in Chinese)
张冬燕,王戎瑞.高功率中红外激光器的进展[J].*激光与红外*, 2011, 41(5): 487-491.
- [5] Zhang Lei, Zheng Xiaobing, Li Shuang, et al. High accurate calibration of optical radiation at middle infrared and far infrared spectrum [J]. *Infrared Technology*, 2006, 128(3): 178-183. (in Chinese)
张磊,郑小兵,李双,等.高精度中远红外辐射定标技术研究[J].*红外技术*, 2006, 128(3): 178-183.
- [6] Hu Shousong. Principles of Automatic Control [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
胡寿松.自动控制原理[M].北京:科学出版社,2001.
- [7] Xiong Jiaqin, Xiong Rui, Wu Jian, et al. The application of idle speed control strategy for incremental PID in the engine [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2013, 30(3): 109-111. (in Chinese)
熊家秦,熊锐,吴坚,等.增量式PID怠速控制策略在发动机上的应用[J].*广东工业大学学报*, 2013, 30(3): 109-111.
- [8] Lin Yan, Huo Yujing, He Shufang, et al. Stabilizing the output power of the all solid state green laser by optoelectronic feedback[J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(1): 48-50. (in Chinese)
林彦,霍玉晶,何淑芳,等.光电反馈法稳定全固态绿光激光器输出功率[J].*激光与红外*, 2005, 35(1): 48-50.