

闭环反馈光纤放大器的设计

陈峰,吕宏伟,韦佳天,杨小亮,伍能,张新立

(中国电子科技集团公司 第三十四研究所,广西 桂林 541004)

摘要:为了提高光纤前端系统输出能量的稳定性,设计了一种闭环反馈功率自动控制的光纤放大器,将放大器分束输出的一路光脉冲信号作为反馈信号,经光/电转换及高速峰值保持电路采样后,采用比例-积分-微分(PID)算法实现了对放大器泵浦电流的自动精确控制。实验结果表明:在注入光脉冲能量波动较大的情况下,该光纤放大器输出能量 2 h 稳定性 P-V 值小于 8%,均方根(RMS)值小于 1%,输出能量稳定性得到了有效提升。

关键词:光纤放大器;闭环反馈;峰值保持;比例-积分-微分算法;稳定性

中图分类号:TN248 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2020)06-0029-03

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.06.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Designed of closed-loop feedback optical fiber amplifier

CHEN Feng, LYU Hongwei, WEI Jiatian, YANG Xiaoliang, WU Neng, ZHANG Xinli

(The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: In order to improve the output energy stability of fiber front-end system, an power automatic control optical fiber amplifier is designed with closed-loop feedback. The amplifier output signal splitting beam is used as a feedback signal. After photoelectric conversion and sampling by the high-speed peak hold circuit, the proportional integral differential (PID) algorithm is used to achieve an accurate control of the amplifier pump current. The experimental results show that under the condition that the energy of the injected large light pulse fluctuates, the P-V value of the fiber amplifier output energy is less than 8% and the root mean square(RMS) value is less than 1% in two hours. The stability of the output energy has been effectively improved.

Key words: fiber amplifier; closed-loop feedback; peak hold; proportional integral differential algorithm; stability

0 引言

随着光纤技术的发展和制造水平的提高,光纤放大器中除了掺铒光纤放大器因光纤通信的发展受到人们的普遍重视外,其它波长(如 1053 nm)的掺镱光纤放大器在功率放大、光传感器中的小信号放大、自由空间激光通信以及超短脉冲放大等领域的应用也越来越广泛^[1]。特别是大型激光驱动装置对光纤前端输出激光稳定性提出了更高的要求,其输出的稳定性直接决定了后续系统是否能够正常工作。目前,国际上大型激光器驱动装置(如美国 NIF、法国 LMJ 激光

装置的前端系统)均采用了全光纤化主控振荡器的功率放大器(MOPA)结构多级放大的技术,因此光纤放大器输出的稳定性直接关系到整个光纤前端系统输出的稳定性。

对于单个光纤放大器而言,泵浦驱动电流、环境温度变化等因素均会使放大器稳定性恶化,通常的解决办法是针对放大器泵浦设计恒流源驱动及温度自动控制。而对于级联的系统级光纤放大传输系统,这种方法往往满足不了系统输出长期稳定性的需求,各设备自身不稳定因素的累计以及级联间功率损耗的不稳定性,将会导致整个系统长时间工作稳定性严重下降。基于此,在温度自动控制的基础上,本文设计一种闭环反馈光纤放大器,通过监测输出光脉冲能量的变化,闭环反馈自动控制泵浦驱动电流,保证光纤放大器长期高稳定输出,有效提升系统的输出稳定性。

收稿日期:2019-11-18。

作者简介:陈峰(1983—),男,广西梧州人,硕士,工程师,研究方向为数字和模拟电子电路,主要从事高稳定低噪声泵浦驱动电路研制、宽带光纤放大器和高精度同步机等相关产品研发工作。参与国家重大专项及广西创新基金等项目的研制工作。



1 系统设计

1.1 闭环反馈光纤放大器原理

闭环反馈光纤放大器主要由微处理器 (MCU) 模块、峰值保持采样模块、温控和驱动模块以及光路模块组成,如图 1 所示。光纤分束器 99% 输出端作为主光路输出信号端,1% 输出端作为闭环反馈输入端,光反馈信号经光衰减、光电探测、运算放大及峰值保持采样电路处理后,MCU 采集相应数据并进行比例-积分-微分(PID)算法处理,最终将反馈结果作用于泵浦激光器的驱动电流,以此来调节激光器的泵浦功率,形成闭环反馈控制。

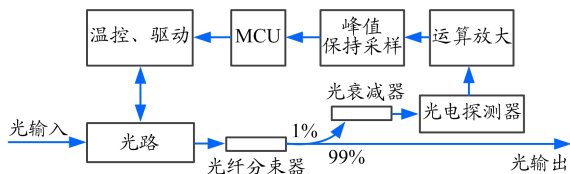


图 1 闭环反馈光纤放大器原理图

光电探测器前置一个光衰减器的目的是防止反馈激光脉冲信号峰值功率过大,导致探测器饱和而无法真实反映激光信号的强度变化。通过合理调节光衰减器,可保证光电探测器工作在非饱和区,提高反馈的精确性。

1.2 窄脉冲峰值保持采样电路

窄脉冲峰值保持采样电路用于纳秒级光脉冲反馈信号峰值的检测与保持,其电路原理图

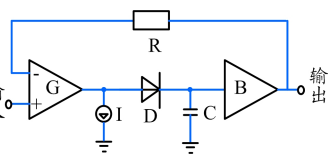


图 2 窄脉冲峰值保持电路原理图

如图 2 所示。该电路为跨导型结构,主要由跨导放大器 G、恒流源 I、二极管 D、保持电容 C、电压缓冲器 B 和电阻 R 组成^[2,3]。其工作原理是:当脉冲信号到达时,输入端电流经过二极管对保持电容充电,直到获取输入信号的峰值电压,并对该峰值电压进行一定时间的保持。对于输入的脉冲信号,需根据二极管的阻抗选择合适的保持电容使得脉冲峰值保持时间设置在百微秒量级。MCU 在该时间段内启动模/数转换器(ADC),并对同一个脉冲信号进行反复多次采集数据。数据采集完成后,保持电容将通过电阻-电容回路进行放电,等待下一个脉冲的到来。

1.3 基于 PID 算法的泵浦电流自动控制

PID 算法具有简单、实用和鲁棒性强等特点,被广泛应用于工业控制中^[4]。其实质是根据反馈计算得到的输入作差值,按比例、积分和微分的函数关系进行

运算,运算结果用以输出控制量。采用增量式离散 PID 算法,控制增量只与前后 3 次测量的误差有关,在减少系统运算量的同时,避免了由于系统误差累加所带来的超调现象。其公式如下:

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (1)$$

其中, $\Delta u(k)$ 为控制增量; k_p 、 k_d 和 k_i 分别为比例、积分和微分系数, $K_i = K_p \frac{T}{T_i}$, $K_d = K_p \frac{T_d}{T}$, T 为采样间隔, T_i 为积分项参数, T_d 为微分项参数; $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 和 $e(k-2)$ 分别为当前及之前 2 次的误差。

基于 PID 算法的泵浦电流自动控制流程如图 3 所示。上电后,MCU 初始化系统,设置光纤放大器的初始工作电流,并采集光纤放大器当前状态下 ADC 采样值,采用周期平均值滤波法对采样数据进行软件滤波。具体处理方法是对每一个脉冲信号进行多次读取 ADC 采样值然后求平均,将此平均值设置为基准值。启动反馈自动控制后,当峰值保持电路检测到脉冲信号,通过硬件触发的方式触发 MCU 采集 ADC 值,同样经过软件滤波后将此反馈值与之前设置的基准值进行比较,判断放大器输出是否满足稳定性目标。如果反馈值满足设定的目标条件,则不改变光纤放大器当前工作状态;反之,则开始启动 PID 算法对误差信号进行计算,并输出合理的控制信号,MCU 根据此控制信号迅速改变 ADC 输出电压,从而实现泵浦激光器驱动电流的自动调节。

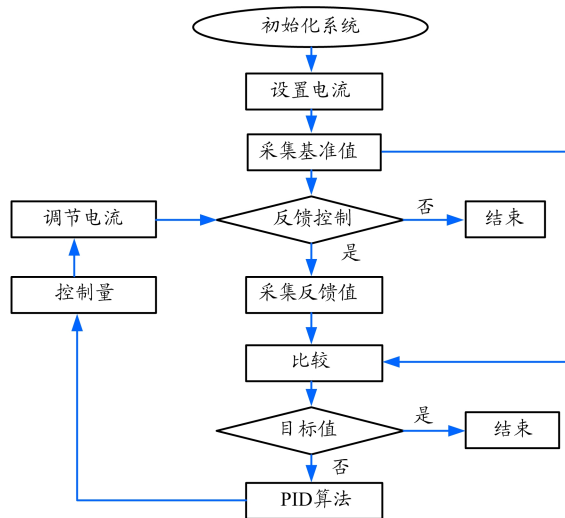


图 3 泵浦电流自动控制流程图

2 实验过程及结果

闭环反馈光纤放大器能量稳定性测试实验装置

如图4所示。输入的光脉冲信号经50:50光纤分束器分成2路:一路直接接能量卡计1;另一路光脉冲信号经闭环反馈光纤放大器放大输出后接能量卡计2。

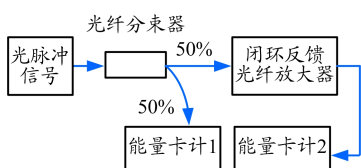


图4 光纤放大器能量稳定性测试实验装置图

闭环反馈光纤放大器上电后系统先初始化各模块工作状态,并完成对DAC输出电压的初始值设置,在实验中设置泵浦电流为90 mA,微处理器开始采集ADC值,并启动PID算法进行自动控制。

本文使用OPHIR公司的能量卡计测量闭环反馈光纤放大器输入/输出激光脉冲信号的能量稳定性。由于测试结果的原始数据为TXT数据文件,本文通过Matlab编程,将TXT数据文件转换成图形文件,并计算出峰峰(P-V)值和均方根(RMS)值。连续观测2 h的测试结果分别如图5和图6所示。通过计算可知,光纤放大器输入端能量稳定性P-V值为20.13%,RMS值为4.52%;输出端能量稳定性P-V值为7.26%,RMS值为0.92%。然后,关闭闭环反馈自动控制,同样连续观测2 h,测试结果如图7所示。当关闭闭环反馈自动控制时,光纤放大器输出能量稳定性P-V值为22.48%,RMS值为5.35%。对光纤放大器闭环反馈控制进行10 h连续工作考核,测量输出能量稳定性,测试结果如图8所示,其输出能量稳定性P-V值为7.95%,RMS值为0.94%。测试结果表明:在注入光脉冲信号能量波动较大的情况下,闭环反馈光纤放大

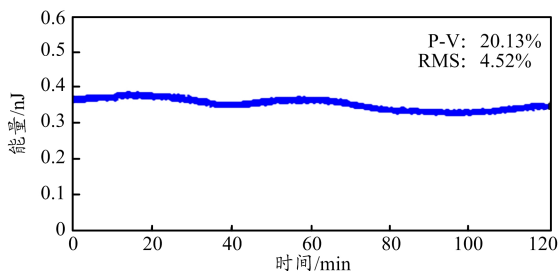


图5 光纤放大器输入能量稳定性

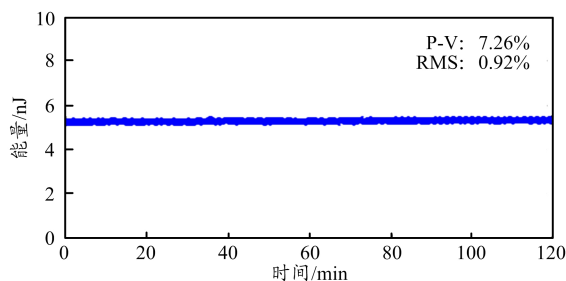


图6 打开闭环反馈控制时光纤放大器输出能量稳定性

器能够有效地提升输出能量稳定性,且效果明显,对于多级光脉冲传输放大的光纤前端系统能量稳定性提升及光纤放大器的研制具有重要的借鉴意义。此外,由P-V值及RMS值可知,闭环反馈光纤放大器输出能量分布更加集中,对于系统输出能量起伏不定的情况,具有很好的改善作用。同时,闭环反馈光纤放大器在长时间连续考核工作条件下,依然能够保证输出能量的稳定性。

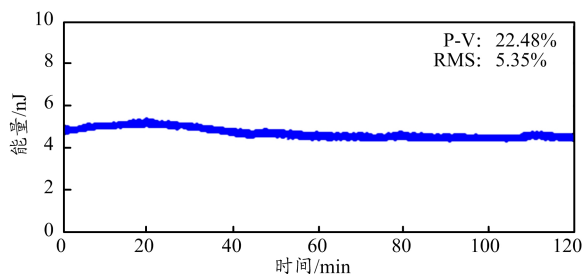


图7 关闭闭环反馈控制时光纤放大器输出能量稳定性

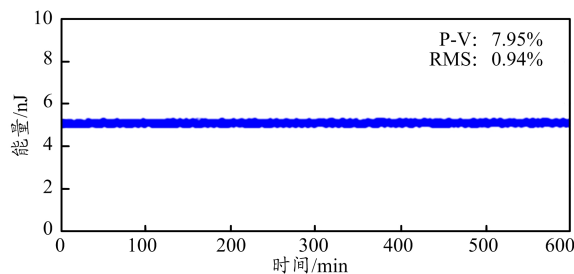


图8 打开闭环反馈控制时光纤放大器10 h输出能量稳定性

3 结束语

本文设计了一种高稳定输出的闭环反馈光纤放大器,基于PID算法实现了泵浦电流自动跟踪反馈控制。实验结果表明:在注入信号能量波动较大的情况下,可有效提升输出能量的稳定性,其2 h能量输出稳定性P-V值为7.26%,RMS值为0.92%;连续10 h输出能量稳定性P-V值为7.95%,RMS值为0.94%,可以很好地满足大型激光驱动装置对光纤前端输出稳定性的需求。

参考文献:

- [1] 马云亮. 掺铒光纤放大器的研究[D]. 上海:复旦大学,2007.
- [2] 宋毅恒, 孟凡斌. 窄脉冲峰值保持电路分析及设计[J]. 光电技术应用,2014,29(2):39-42.
- [3] 张健. 高速窄脉冲峰值保持电路设计与实现[J]. 电子设计工程,2014,22(9):117-119.
- [4] 战俊彤,付强,段锦,等. 利用位置式数字PID算法提高DFB激光器驱动电源稳定性[J]. 红外与激光工程,2015,44(6):1757-1761.