

文章编号: 1671-0576(2021)01-0032-05

# 基于自动功率控制的 EDFA 泵浦驱动设计

姜倩文, 徐雅燕, 林瑜佳, 李文康, 蒲 彬

(上海无线电设备研究所, 上海 201109)

**摘 要:** 为满足空间光通信系统对掺铒光纤放大器(EDFA)高增益高稳定性的应用需求, 采用级联泵浦结构, 设计了一种自动功率控制的 EDFA 泵浦驱动电路。利用模拟比例-积分-微分(PID)控制器和基于对数放大器的高精度功率监测电路对驱动电路进行闭环控制, 实现光放大信号的恒功率稳定输出。试验结果表明: 利用该系统可以控制 EDFA 实现 33 dBm 以上的恒定光功率输出, 功率稳定度在 1% 以内, 且光谱特性良好。

**关键词:** 掺铒光纤放大器; 泵浦驱动; 功率控制

**中图分类号:** TN242

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1671-0576.2021.01.006

## EDFA Pump Driver Design Based on Automatic Power Control

JIANG Qian-wen, XU Ya-yan, LIN Yu-jia, LI Wen-kang, PU Bin

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** In order to meet the application requirements of space optical communication for high gain and high stability of erbium-doped fiber amplifier (EDFA), a pump driving circuit with automatic power control is proposed based on cascade structure. The analog proportion integration differentiation (PID) controller and high precision power monitoring circuit based on logarithmic amplifier are used to control the pump driving circuit in a closed loop, and the constant power output of optical signal is obtained. The experimental results show that the system can achieve constant optical power output of more than 33 dBm with good spectral characteristics, and the power stability error is less than 1%.

**Key words:** erbium-doped fiber amplifier; pump driving; power control

## 0 引言

随着卫星激光通信技术向着长距离、高速率

的方向发展, 对通信链路发射端提出了大功率、高可靠性、高调制速率的要求<sup>[1]</sup>。掺铒光纤放大器(EDFA)作为空间光通信最常用的光放大器, 面临大功率、低噪声、高稳定性的性能需求。EDFA 基本结构主要包括激光泵浦源、掺铒光纤(EDF)以及光无源器件, 其中激光泵浦源是决定 EDFA 增益大小和能否稳定输出的核心因素之

收稿日期: 2020-12-19

作者简介: 姜倩文(1994—), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事光电接收技术研究。

—<sup>[2-3]</sup>。由于半导体泵浦源电流和温度的任何微小变化都会影响 EDFA 的输出状态<sup>[4-5]</sup>,为保证 EDFA 的恒定输出,稳定可靠的泵浦驱动控制电路至关重要<sup>[6]</sup>。

本文设计了一种基于自动功率控制(APC)的高功率 EDFA 泵浦驱动电路,利用模拟比例-积分-微分(PID)控制电路和基于对数放大的功率监测电路实现对功率驱动电路的闭环控制,保证光放大信号的恒功率稳定输出。

## 1 级联 EDFA 结构

为实现高功率的激光发射,系统采用级联泵浦机制对入射光信号进行放大,两级串联泵浦结构如图 1 所示。分光器 Tap1 和 Tap2 按照对应的分配比例将大部分能量透射进光纤系统,同时吸收小部分入射光能量送入光电检测器 Monitor1 和 Monitor2,用以监测 EDFA 输入或输出光功率。光隔离器 ISO1~ISO3 可抑制信号光反射形成的自激振荡,并隔离后向放大器自发

辐射噪声(ASE)。泵浦激光器 Pump1 和 Pump2 用于提供光激励,通过波分复用器 WDM1 和 WDM2 分别将泵浦光耦合至掺铒光纤 EDF1 和 EDF2,将基态铒离子抽运至较高能级。光滤波器 Filter1 和 Filter2 对主波长附近的信号光滤波,同时过滤掉泵浦光源产生的噪声光信号,保证输出信号光的光谱质量。

两级泵浦结构中,由于前级的输入光信号功率较小,为减小系统预放大噪声系数,EDF1 长度较短,使光纤内粒子数充分反转,提高前级光放大信噪比。Pump1 选用 980 nm 单模泵浦激光器,内部集成热敏电阻及半导体制冷器(TEC),具有高量子效率、低噪声、高稳定性的特点。Pump1 驱动电路设计为固定增益,以获得合适的前级输出功率。Pump2 和 Pump3 采用两路大功率多模泵浦激光器并联设计,通过自动功率控制电路调节泵浦激光器回路驱动电流,保证 EDFA 的稳定输出。同时二级掺铒光纤 EDF2 长度较长,当泵浦光增大时能充分转换为信号光,获得较大的输出增益。

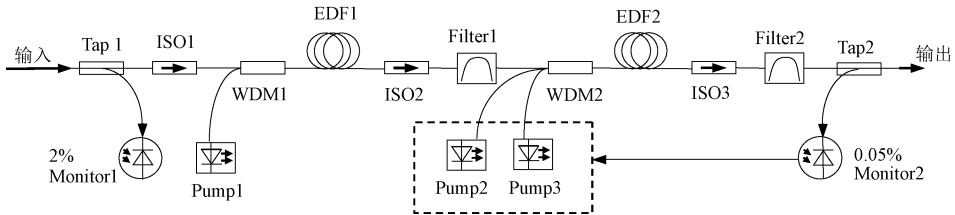


图 1 EDFA 级联泵浦结构

## 2 APC 驱动电路设计

### 2.1 基于模拟 PID 的功率控制电路

APC 采用 PID 控制系统,如图 2 所示。系统设定光功率对应的设置电压  $U_{ref}(t)$  与输出抽运光功率对应的采样电压  $U_{mon}(t)$  之差为功率误差电压  $U_e(t)$ ;  $U_e(t)$  进入模拟 PID 控制器,经过比例单元  $K_p U_e(t)$ 、积分单元  $K_i \int U_e(t) dt$  和微分单元  $K_d dU_e(t)/dt$  处理并线性组合后形成被控电压  $U_{ctl}(t)$ ,其中  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  为误差幅度调节参数;再用  $U_{ctl}(t)$  对二级泵浦驱动电路的泵浦电流进行控制,从而保证 EDFA 光功率稳定输出<sup>[7]</sup>。

图 2 虚线框内为模拟 PID 控制器。其中:比

例单元  $K_p U_e(t)$  用于即时调节被控系统偏差的比例步进,偏差信号一旦产生,模拟 PID 控制器便立即产生控制作用,当比例作用过大时可能导致系统振荡次数增加,稳定性降低;积分单元  $K_i \int U_e(t) dt$  用于消除系统稳态误差,积分强弱取决于系统积分时间;微分单元  $K_d dU_e(t)/dt$  反映系统误差信号变化速率,通过引入误差的偏差修正预判,减小恒功率控制系统的调节时间。

本文利用运算放大器构成模拟 PID 控制器,具体电路如图 3 所示。

根据系统设定的 EDFA 恒定输出功率值,计算得出二级泵浦驱动所需控制电压  $U_{ref}$ 。  $U_{ref}$  送入运算放大器 A 的同向输入端,反向输入端为电阻 R1、R2 和电容 C1、C2 组成的负反馈控制电

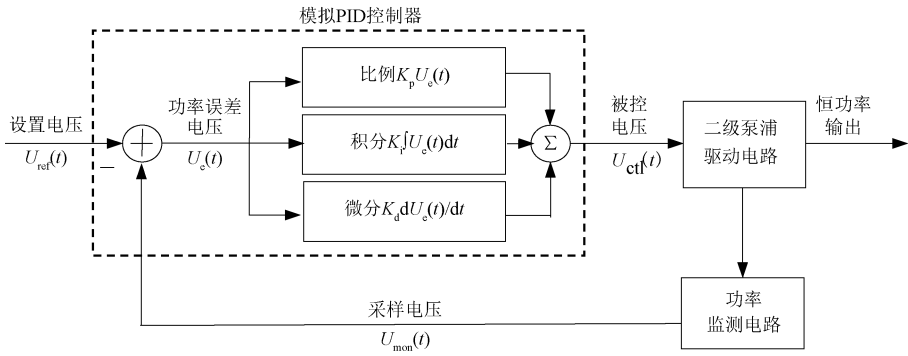


图 2 基于 PID 的自动功率控制框图

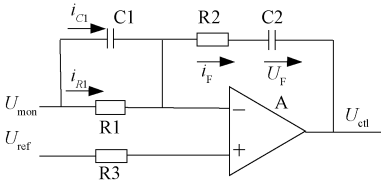


图 3 模拟 PID 控制器电路

路,  $i_F$  和  $U_F$  分别为反馈端电流和电压,  $U_{\text{mon}}$  为经功率监测电路采样的实际输出抽运功率对应电压, 由此计算抽运功率控制电压  $U_{\text{ctl}}$ 。

流经电阻  $R_1$  的电流为

$$i_{R1} = \frac{U_{\text{mon}} - U_{\text{ref}}}{R_1} = \frac{U_e}{R_1} \quad (1)$$

流经电容  $C_1$  的电流为

$$i_{C1} = C_1 \frac{d(U_{\text{mon}} - U_{\text{ref}})}{dt} = C_1 \frac{dU_e}{dt} \quad (2)$$

根据模拟运放虚断原则, 反馈端电流  $i_F$  和电压  $U_F$  计算公式分别为

$$i_F = i_{R1} + i_{C1} = \frac{U_e}{R_1} + C_1 \frac{dU_e}{dt} \quad (3)$$

$$U_F = \frac{1}{C_2} \int i_F dt = \frac{1}{R_1 C_2} \int U_e dt + \frac{C_1}{C_2} U_e \quad (4)$$

由此得出抽运功率对应控制电压  $U_{\text{ctl}}$  为

$$U_{\text{ctl}} = U_{\text{ref}} - \left( \frac{R_2}{R_1} + \frac{C_1}{C_2} \right) U_e - R_2 C_1 \frac{dU_e}{dt} - \frac{1}{R_1 C_2} \int U_e dt \quad (5)$$

可以看出, 被控抽运功率端为负反馈调节机制, 当 EDFA 在工作过程中受到温度或输入光信号扰动时, 功率监测电路的探测光功率变化随即被反馈到运放反向输入端, PID 控制器电路将根据运放同向输入端和反向输入端的差值电压及时调整驱动回路电流, 使系统重新达到动态平衡。

## 2.2 二级泵浦驱动电路

半导体泵浦激光器为电流注入型器件, 驱动电路的电流需连续可调, 因此本文设计了图 4 所示的电流积分负反馈电路来实现驱动电源的控制。因图 1 中 Pump2、Pump3 的驱动电路为完全相同的并联电路, 图 4 中泵浦激光器用 Pump 表示。运算放大器 A1 选用轨到轨运算放大器 AD8552, 场效应管 MOSFET 选用 IRL5NJ024。模拟 PID 控制器输出的控制电压  $U_{\text{ctl}}$  经过运算放大器 A1 及电容 C1 组成的电流积分电路对 MOSFET 进行控制。改变电容 C1 的容值可以控制 MOSFET 的打开时间, 消除开关合时产生的浪涌电流, 实现驱动电路缓启动。2.2 V 电源为泵浦激光器提供偏压, 当 MOSFET 打开时, 激光器回路导通, 导通电流由控制电压  $U_{\text{ctl}}$  决定。电阻 R4 为采样电阻, 本文选用  $0.1 \Omega$  的功率电阻。采样电压经放大后进入信号处理系统, 实现驱动回路工作电流的监测和控制。

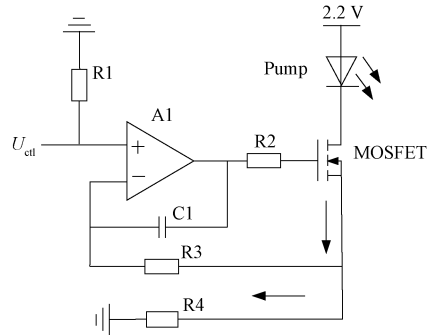


图 4 泵浦驱动电路

## 2.3 功率监测电路

基于对数放大电路设计了一种高精度宽动态范围的功率监测电路。光电二极管将 EDFA 输出端分光器分得的小部分光信号转换成电信号,

经过对数放大电路的放大处理,作为模拟 PID 控制器的反馈输入信号。原理图如图 5 所示。

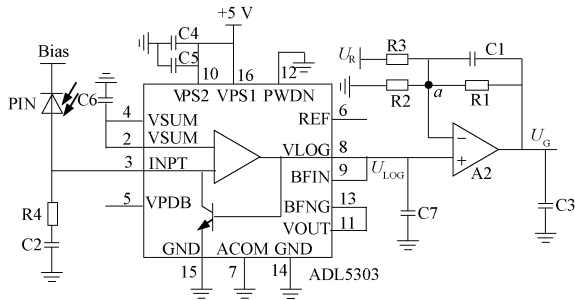


图 5 对数放大功率监测电路

光电探测器选用 InGaAs 型 PIN 光电二极管,该型光电二极管在 1 550 nm 波长下响应度为 0.95 A/W,具有响应速度快、受温度影响小的特点。选用 ADL5303 高精度对数转换器,利用双极型晶体管的基极-射极电压与集电极电流的对数关系,实现被探测光电流的对数转换。本电路具有 160 dB 的动态范围,且对数输出斜率截点可调,以适应电源电压变化。Bias 为 PIN 光电二极管提供反向偏置电压,光照时产生的反向光电流随光强变化,进入对数放大器的输入级。施加于放大器 INPT 引脚的输入电流  $I_{PD}$  与中间级对数输出引脚的电压  $U_{LOG}$  关系为

$$U_{LOG} = U_K \log_{10}(I_{PD}/I_Z) \quad (6)$$

式中: $U_K$  为斜率电压; $I_Z$  为截点电流。为适应后级信号处理量程子范围,增加了斜率和截点调整电路。调整电路由运算放大器 A2 和外部反馈电阻 R1、R2、R3 组成,运算放大器 A2 同样选用 AD8552, $U_R$  为外部基准电压源,为缓冲器反馈端提供偏压, $U_G$  为监测电路输出电压。根据基尔霍夫电流定律,节点 a 处的电流  $i_{R1}$ 、 $i_{R2}$ 、 $i_{R3}$  三者关系为

$$i_{R3} - i_{R2} - i_{R1} = 0 \quad (7)$$

则有

$$\frac{U_R - U_{LOG}}{R_3} - \frac{U_{LOG}}{R_2} = \frac{U_{LOG} - U_G}{R_1} \quad (8)$$

经过整理可以得到

$$U_G = \left( 1 + R_1 \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \right) U_{LOG} - \frac{R_1}{R_3} U_R \quad (9)$$

系统实际输出光功率为 (20 ~ 33) dBm,分光比为 0.05% 时,输出端 PD 实际接收功率为 (-13 ~ 0) dBm。若斜率电压  $U_K = 0.2$  V,截点

电流  $I_Z = 100$  pA,由此计算得到 VLOG 端输出电压  $U_{LOG}$  为 (1.14 ~ 1.40) V。驱动回路可用量程为 (0 ~ 5) V,基准电压  $U_R$  为 2.5 V,为获得合适的电压输出范围,反馈电阻的阻值分别为  $R_1 = 15.0$  k $\Omega$ ,  $R_2 = 64.7$  k $\Omega$ ,  $R_3 = 3.3$  k $\Omega$ ,则输出电压  $U_G$  为 (2.03 ~ 3.53) V。通过调整反馈电阻 R1、R2、R3 的阻值,电路可以适用于不同量程范围的功率监测应用。

### 3 EDFA 调试及试验结果

设输入信号光源峰值波长 1 559 nm,实际光功率 0 dBm,要求 EDFA 输出光功率在 33 dBm 以上,且功率恒定可调。

前级泵浦源设置为固定增益,后级泵浦源保证恒功率输出。通过闭环电路监测输出光功率并控制后级泵浦源的驱动电流,当 EDFA 受输入信号光功率波动或温度等影响导致输出功率变化时,功率监测电路的光电流响应随之发生变化,模拟 PID 控制器依据偏差量改变控制电压,调整功率输出。采用两个相同泵浦激光器同时工作,可在提高系统可靠性的同时分担大电流压力。输出光功率设定为 33 dBm 时,2 h 内测定的输出功率如图 6 所示,功率稳定度在 1% 以内。

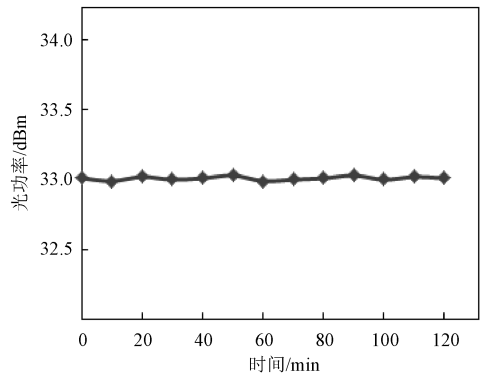


图 6 EDFA 输出功率实测曲线

被测电路底部设置热沉,测量工作时间 2 h 内 Pump2 和 Pump3 的温度及驱动电流,如图 7 所示。可以看出,随着后级泵浦激光器温度升高,APC 电路实时调整驱动电流,光功率稳定输出,40 min 后模块温度趋于稳定,达到热平衡。

对衰减后的输出信号光进行波长测试,输出光谱如图 8 所示。输出光谱中心波长为 1 559 nm,与输入光源峰值波长一致。

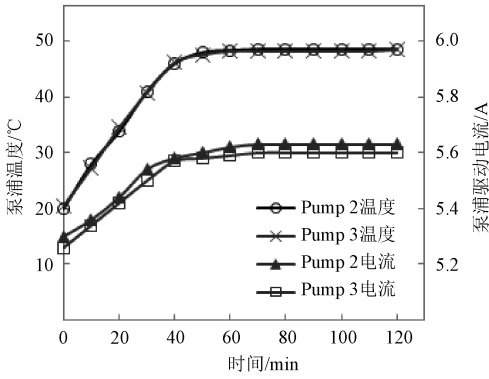


图 7 泵浦激光器温度及驱动电流测试

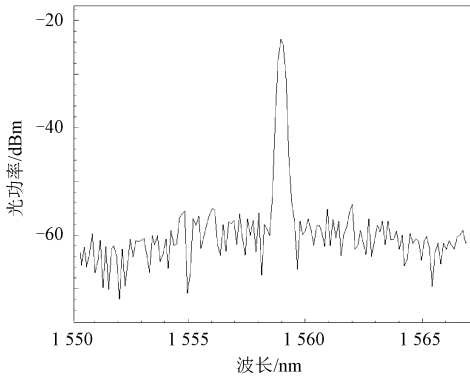


图 8 EDFA 输出光谱图

## 4 结束语

本文介绍了一种级联式 EDFA 自动功率控制泵浦驱动电路。功率控制电路采用模拟 PID 控制器实现功率误差的实时调整;泵浦驱动电路利用电流积分负反馈实现驱动电源的有效控制;功率监测电路基于对数放大器实现高精度量程可

调光电信号的监测。相比利用数字处理器实现功率的自动控制,本设计利用模拟电路闭环调整泵浦驱动电流,使 EDFA 稳定工作在系统设定的功率点,具有复杂度低、功耗低、可靠性高的优点。试验结果表明:本自动功率控制电路可控制 EDFA 实现 33 dBm 以上的恒功率输出,功率稳定度在 1% 以内,对实际工程应用中选取控制参数、优化系统性能具有指导意义。

## 参考文献

- [1] 佟首峰,姜会林,张立中. 高速率空间激光通信系统及其应用[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 649-654.
- [2] 田小建,尚祖国,高博,等. 980 nm 高稳定度激光泵浦源控制系统[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 982-987.
- [3] BHARDWAJ N, GUPTA N. A novel technique to minimize gain-transient time of cascaded EDFA using fuzzy logic controller[J]. International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences, 2013, 4(6): 569-573.
- [4] 吴国轩. 低噪声 EDFA 和光纤液面定位传感器光源稳定驱动设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2019: 23-28.
- [5] 谭莉,倪文俊,丁永奎,等. L-band EDFA 中 980 nm 泵浦激光器驱动控制电路的设计与调试[J]. 光子技术, 2003, 1(1): 38-41.
- [6] 程前,邓华秋. 半导体激光器驱动电路及温控系统设计[J]. 2019, 42(5): 1185-1189.
- [7] 占生宝,丁健. EDFA 增益瞬态控制研究的最新进展[J]. 激光技术, 2015, 39(5): 706-711.