

# 便携式光源、光功率计系统开发与设计

张翔, 陈涛, 金操帆, 郭跃, 汪行景

中国电子科技集团公司第二十三研究所, 上海 201900

**摘要** 基于数字超模取样光栅型反射(DS-DBR)激光器和 InGaAs 光电探测器设计了一款便携式光源、功率计系统。该系统的光源模块采用 OPA569AIDWP 芯片和 ADN8834 芯片为控制核心,对波长精度和功率稳定性实现了很好的控制;功率计模块采用多挡位放大量程控制技术、屏蔽降噪技术,并结合软件算法,显著抑制了系统噪声,提高了功率计的灵敏度和动态范围。测试结果表明:光源模块可以有效控制输出光的波长,并且输出光边模抑制比大于 50 dB,线宽小于 1 MHz,具有良好的输出质量;功率计模块的动态范围达到了 80 dB,线性度提升到了 0.08 dB。另外,本系统采用嵌入式控制技术进行人机交互,适用于实验室和工业现场等多种应用场景,大大扩展了系统的使用范围和便携性,市场前景广阔。

**关键词** 光学器件; 波长调谐; 灵敏度; 温度控制; 校准算法

**中图分类号** TN24

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP56.212301

## Design and Development of Portable Light Source and Power Meter System

Zhang Xiang, Chen Tao, Jin Caofan, Guo Yue, Wang Yanjing

No. 23 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 201900, China

**Abstract** A portable light source and power meter system has been designed based on a digital supermode distributed Bragg reflection (DS-DBR) laser and an InGaAs photodetector. The light source module of the system uses both the OPA569AIDWP chip and the ADN8834 chip as the controlling core, providing excellent control of the wavelength accuracy and power stability. The power meter module employs the multi-grade amplification range control and insulation denoising technologies along with the software algorithms, which significantly suppresses the system noise and improves the sensitivity and dynamic range of the power meter. The test results demonstrate that the light source module can effectively control the output light wavelength. Also, the side-mode suppression ratio of the output light is higher than 50 dB, and the linewidth is smaller than 1 MHz with satisfactory output quality. Furthermore, the dynamic range of the power meter module reaches 80 dB, and the linearity is increased to 0.08 dB. In addition, our system adopts an embedded control technology to allow human-computer interaction; thus, it can be applied to various settings such as laboratories and industries. Therefore, with such attractive and broad market prospects, the application range of our portable system is considerably broadened.

**Key words** optical devices; wavelength tuning; sensitivity; temperature control; calibration algorithm

**OCIS codes** 230.2285; 060.3510; 140.3510

## 1 引言

随着光纤通信及光纤传感技术的发展,激光光源和光功率计已经成为新型光网络中各种应用环境必备的测试仪器<sup>[1]</sup>。在光纤通信系统中,激光光源的线宽、波长稳定性、功率稳定性、边模抑制比等指

标对系统的性能有着重要的影响。当前的新型光网络系统不仅要具备基本的传输功能,还应该支持光分组交换和波长路由功能。伴随着系统信道数目的增多,单波长激光器的数量和类型也相应增加,从而导致大量的冗余配置,系统的复杂度和成本急剧上升,因此传统的单波长激光器并不适用于高密度波

收稿日期: 2019-04-03; 修回日期: 2019-04-12; 录用日期: 2019-04-30

\* E-mail: 513646562@qq.com

分多路复用技术(DWDM)系统中。目前市面上的便携式光功率计的动态范围较窄、线性度较差,当光功率小于 $-60$  dBm 或动态范围超过  $80$  dB 时,多数光功率计难以满足高精度测试的需求<sup>[2]</sup>,而能够满足高精度条件的,又存在体积较大、便携性较差等问题。

本文基于数字超模取样光栅反射(DS-DBR)激光器和低暗电流、高响应度的铟镓砷(InGaAs)光电探测器,设计了一款便携式波长可调谐光源功率计系统。通过设计激光器电流驱动电路和温度控制电路,同时结合高精度反馈控制算法,来保证系统光源输出激光波长和功率的稳定性。通过设计小信号光电探测电路、多挡位放大量程控制电路优化电源电路,同时结合中位值滤波算法和分区校准算法达到滤波和降噪的目的,最终实现高灵敏度、大动态范围的光功率测量。本文设计

的便携式波长可调谐光源功率计系统可广泛应用于光纤通信和传感系统的研发测试、系统集成等应用环境,并由于兼具便携性和易操作等特点,也可以应用于通信线路检测维护。

## 2 系统方案设计

如图 1 所示,系统分为光源模块、功率计模块以及功能模块三部分。

光源模块中,DS-DBR 激光器采用恒功率(APC)驱动方式。中央处理机(CPU)控制器对激光器输出光功率进行采样,并将其作为参考值,通过控制负反馈模拟电路对驱动电流进行反馈调节,从而保持输出光功率的稳定;另外,由于 DS-DBR 激光器的输出波长受温度变化的影响显著,因此本系统采用温度精细调节的方式来实现光源的波长调谐。

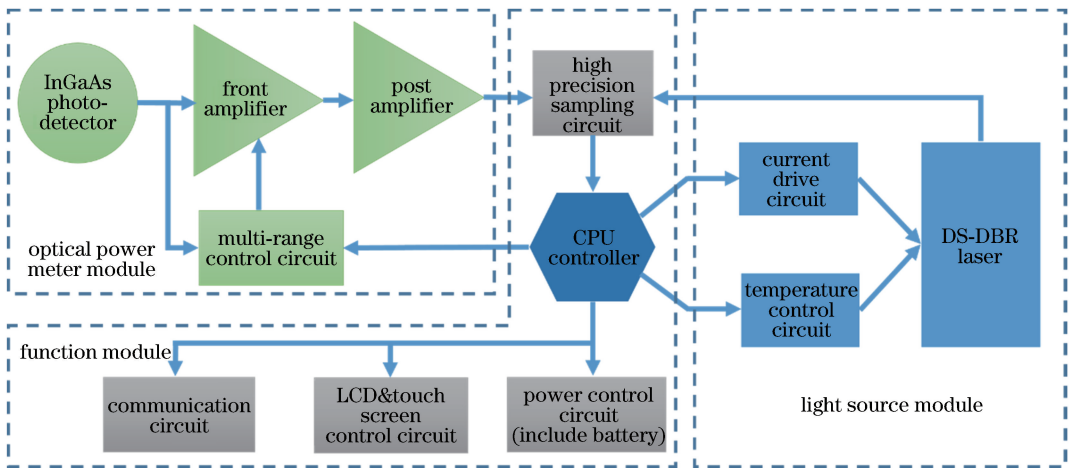


图 1 系统框图

Fig. 1 System block diagram

功率计模块中,待测光信号入射到 InGaAs 光电探测器表面,通过光电转换过程,光信号转换成相应的光电流<sup>[3]</sup>。光电流经两级运算放大器进行电流-电压转换、电信号放大和信号降噪处理等过程,再由高精度采样电路转换成为数字信号后,由 CPU 控制器集中处理。CPU 控制器能够对数字信号采样值进行自动判断,通过控制模拟开关调整前置放大器的放大倍数,以达到量程匹配的功能,最终获取合适的电压值。

功能模块中,CPU 控制器作为系统的核心器件,对光源模块和功率计模块的实时参数进行集中处理,并将相关参数通过 LCD(Liquid Crystal Display,液晶屏)触摸模块和 USB 通信模块与用户进行交互,数据保存于 Micro SD 卡(Micro Secure

Digital Memory Card,微型安全数码卡)中。另外,为保障各模块的长期稳定工作,系统电源经过特殊处理,具备噪声低、输出精度高的特点,并且可以通过内置电池驱动。

## 3 系统硬件设计

### 3.1 微处理器最小系统

系统的微处理器采用意法半导体的 STM32F407ZET6,该芯片基于 Cortex-M4 内核,具备浮点运算能力,支持增强的数字信号处理器(DSP)处理指令,拥有高达  $1$  MB 的片上闪存(FLASH)和  $196$  kB 的内置 SRAM(Static Random-Access Memory,静态随机存取存储器)。以最高工作频率  $168$  MHz 运行时,可达到

210DMIPS(即每秒 210 百万条指令)的处理能力。作为总控核心,该处理器负责光源模块、功率计模块和功能模块之间的协调工作。图 2 为处理器及其外围电路接口图,该系统支持 SDIO 接口、USB 接口、FSMC 接口;芯片通过 SDIO(Secure Digital Input and Output,安全数字输入输出卡)接口实现 TF

(Trans-Flash)卡信息的存取;通过 USB(Universal Serial Bus,通用串行总线)通信接口实现上位机指令的接收和信息反馈,可根据指令要求设置光源模块和功率计模块的工作点;通过 FSMC(Flexible Static Memory Controller,可变静态存储控制器)接口实现与液晶触摸屏的数据交互。



图 2 处理器及其外围电路接口

Fig. 2 Processor and peripheral interface circuit

### 3.2 光源模块

光源模块包含 DS-DBR 激光器及其相关驱动电路,主要分为电流驱动电路和温度控制电路。

#### 3.2.1 数字超模取样光栅型激光器(DS-DBR)

DBR 型可调谐半导体激光器是通过电流的注入改变载流子的浓度,以此来改变光栅区的有效折射率,完成波长的调谐。早期的 DBR 型可调谐半导体激光器波长调谐范围较窄,但是随着一些新型器件结构的提出,多种单片集成 DBR 型可调谐半导体激光器可以实现较宽的波长调谐范围<sup>[4]</sup>。本系统选用 DS-DBR 型激光器,如图 3 所示,DS-DBR 型激光器引入相位光栅的同时利用前后取样光栅的游标效

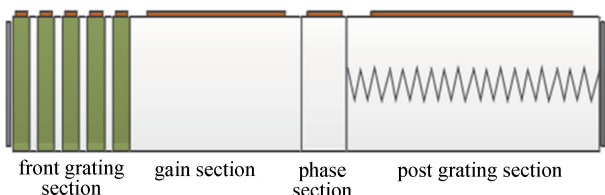


图 3 数字超模取样光栅型激光器

Fig. 3 Digital supermode distributed Bragg reflector laser

应实现了几十纳米的波长调谐范围<sup>[5]</sup>。

#### 3.2.2 激光器的电流驱动电路

本系统中,激光器电流驱动电路的核心芯片为 OPA569AIDWP,该芯片是一款低成本、高输出电流的功率运算放大器,用于在低压电源上驱动各种负载,并具有电流和温度的监控功能,用于反馈控制,以建立稳定的输出电流。有效的散热方式可以保证激光器在高功率输出时的稳定运行<sup>[6]</sup>,该芯片采用德州仪器的 SO-20 Power PAD 封装,体积小、易于散热,可极大降低电路板面积,驱动电路如图 4 所示。

#### 3.2.3 激光器的温度控制电路

由于 DS-DBR 激光器的输出波长会受到温度变化影响,利用此特点,通过温控技术改变激光器有源区折射率,可以改变激光器输出波长。本系统的波长控制方法是基于佩尔捷效应来调整波长。

在半导体激光器的自动温度控制应用中,通常用热敏电阻作为传感器来检测环境温度,并通过控制温度控制器(TEC)的电流大小和方向来实现温度

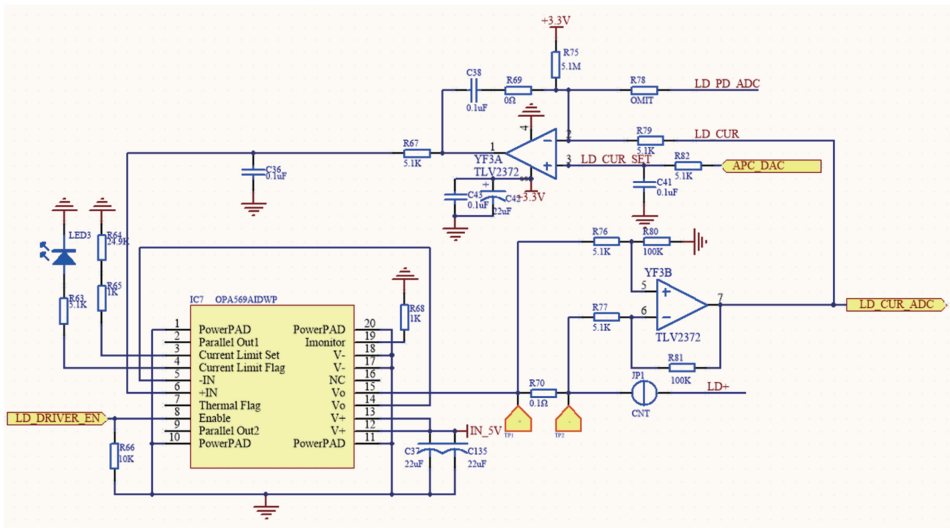


图 4 电流驱动电路

Fig. 4 Current driven circuit

控制,半导体激光器的 TEC 驱动一般分为线性电流和脉冲宽度调制(PWM)两种形式。本系统采用 ADN8834 作为 TEC(Thermoelectric Cooler, 半导体制冷器)控制器,该芯片内部集成了线性控制器、PWM 控制器和两个具有零漂移、轨到轨特性的运算放大器<sup>[7]</sup>。通过测量热敏电阻反馈电压产生的误差信号,并使用集成运算放大器作为比例-

积分-微分(PID)补偿器进行相位延迟补偿,同时由 PWM 控制器与线性控制器在 H 桥的配合下,控制 MOSFET 的关断。若当前温度高于目标温度时,H 桥就驱动 TEC 向制冷一侧输出电流;若当前温度低于目标温度时,H 桥减小 TEC 的一侧电流,或反转电流方向进行加热。具体实现电路如图 5 所示。

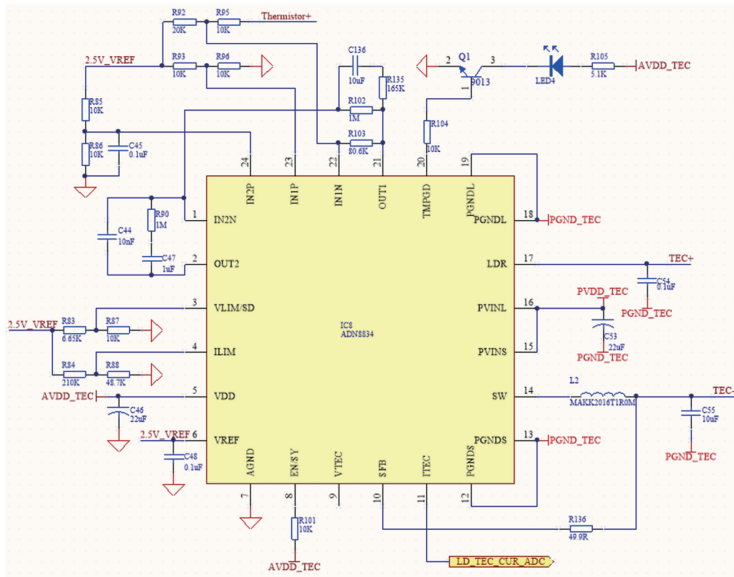


图 5 自动温度控制电路

Fig. 5 Automatic temperature control circuit

### 3.3 功率计模块

光电探测器是光功率测量的核心器件,它的作用是将输入的光功率变换成光电流。本系统选用的 InGaAs 型光电探测器是一种低噪声、高响应的光电探测器,在 800~1700 nm 波段具有较高的光谱响

应度,可达到 0.8 A/W<sup>[8]</sup>。相比基于雪崩光电二极管(APD)的探测器,它不需要单独设计高压偏置电路,能够满足光纤通信波段的测试需求。基于暗电流、上升时间、偏置电压、带宽等因素,采用 InGaAs 型光电探测器能够显著降低系统噪声,提高整机的



测量线性度、灵敏度以及光功率的测量范围。

本系统选用的光电探测器,能够产生 0.3 nA~3 mA 的光电流,所以在信号处理上要注意其他信号产生的影响。功率计模块中光电转换放大电路是保障光功率计测量范围、线性度和测量精度等指标的关键部分。电路中的前置和后置放大器利用低噪声、低偏置电流、宽频带的运算放大器芯片,采用阻抗变换型放大电路方案;电阻采用低噪声的金属膜电阻器,电容采用损耗较小的云母电容和瓷片电容。另外为屏蔽外电磁场的干扰,在悬空的浮地端串联

一个小电阻到地端<sup>[1]</sup>。通过阻抗匹配设计、优化电信号传输电路等降噪技术,可实现光功率计的高灵敏度检测。

多挡位放大量程控制电路通过判断光信号转换成光电流的大小,控制模拟开关,切换前置放大电路中增益电阻的大小,将前置运放的增益设置在合适挡位上,不仅可以扩展测量范围,还能够避免增益不当造成的测量误差。为保障系统的功率计模块在-60 dBm~+20 dBm大动态范围内测量的灵敏度与线性度,设计如图 6 所示的实现电路。

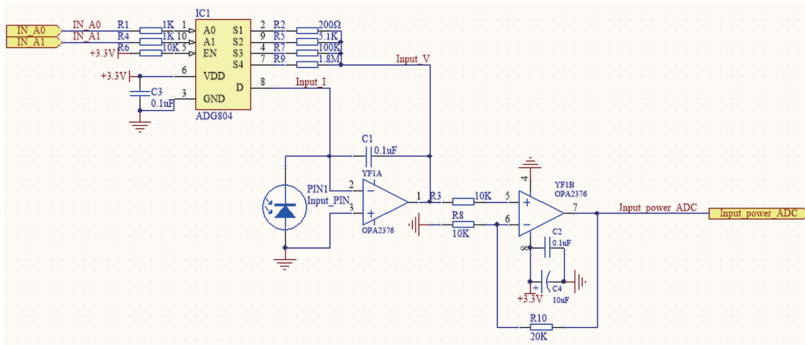


图 6 多挡位放大量程控制及采样电路

Fig. 6 Multi-range control and sampling circuit

### 3.4 功能模块

本系统通过液晶触摸屏实现人机交互功能,要实现高效的功率、电流等信息的采集与显示,对系统的处理速度要求较高。STM32F407 系列芯片带有 FSMC 接口,即灵活的静态存储控制器接口,能够与同步或异步存储器连接。本系统将液晶触摸屏模块当作 SRAM 存储器来控制,以实现信息的快速交互,具体实现电路如图 7 所示。

模块、功率计模块和各功能模块的驱动部分均处于正常工作的状态。然后加载配置参数,将各模块调整到指定工作点。系统采用德国 SEGGER 公司开发的 emWIN 平台作为液晶显示界面的开发库,可为图形 LCD 设计提供高级支持,极大地简化了 LCD 设计,既能提高设计界面图形质量,又可大大减少开发时间。emWIN 界面加载完成后,软件在主循环中对触摸屏模块进行周期扫描,对采样数据进行周期处理,对上位机通信指令进行周期响应,最后将实时数据显示到液晶屏上。

### 4.2 中位值滤波算法

本系统硬件电路中共有激光器驱动电流、激光器管芯温度、激光器输出光功率、功率计输入光功率、电池工作电压、电池工作电流、模块温度等状态参数需要集中处理,多种数据必然存在大量的白噪声。如果采用单通道轮询的方式进行采集并顺序处理,将会大大影响系统的实时性。本系统采用直接内存存取(DMA)的处理方式将 ADC 多通道采集的数据实时存储到内置的 SRAM 中,此过程不需要 CPU 控制器的参与,提高了系统的运行效率。

对于采样数据的处理,软件采用中位值滤波算法。将存储在 SRAM 中的各通道采集数据按照不

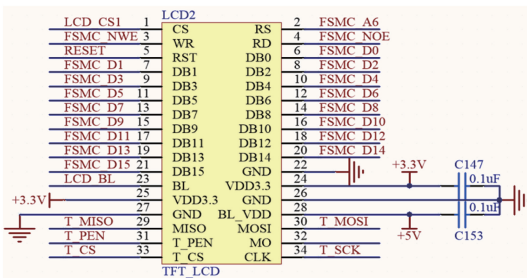


图 7 基于 FSMC 接口的液晶触摸屏控制电路

Fig. 7 LCD touch screen control circuit based on FSMC interface

## 4 系统软件设计

### 4.1 底层驱动软件设计

底层驱动软件的运行流程图如图 8 所示,首先基于 CPU 控制器对系统进行硬件初始化,使光源

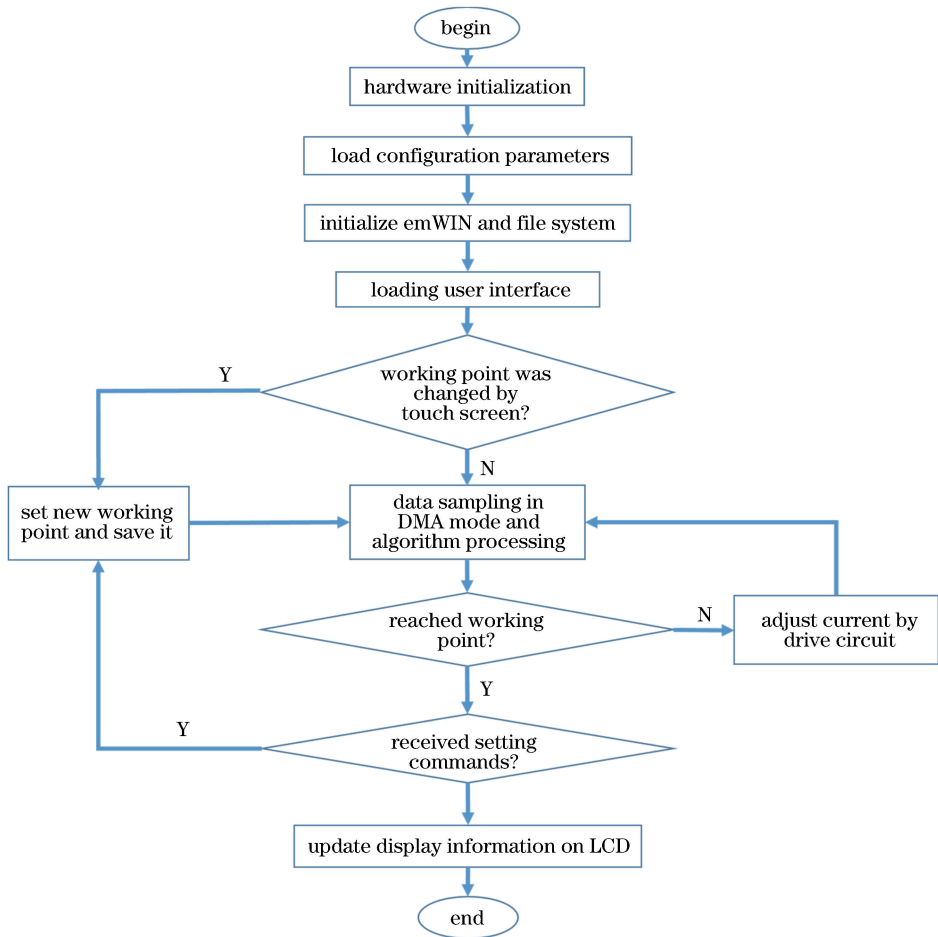


图 8 底层驱动程序运行流程图

Fig. 8 Running flowchart of underlying driver software

同的指针类型进行分类,当某参数采集点数达到 20 个的时候,由 CPU 控制器执行一次排序任务,去掉 4 个极值,计算剩下 16 个数据的算术平均值,将此数据作为此次采集的有效数据。本算法可以消除由于随机信号干扰引起的采样值偏差。软件配置 DMA 方式每  $5 \mu\text{s}$  进行一次数据转换,因此实时性较高。

### 4.3 分区间校准算法

同一 InGaAs 光电探测器的光电转换效率曲线在整个探测功率范围内并不是一条直线,不同波长

光电探测器的光电转换效率曲线线性度并不相同,所以由采样电路获得的数字信号,并不能直接代表光功率的实际大小。本系统为了扩大检测范围,采用多挡位放大量程控制电路,所以必须对光功率进行校准,才能保障系统的功率计模块在  $-60 \text{ dBm} \sim +20 \text{ dBm}$  大动态范围内测量的灵敏度与线性度。光功率计模块的校准原理如图 9 所示,LD 光源的输出光经过连续可调的衰减器和 50:50 光分束器,分别输入标准光功率计和待校准光功率计。对于不同大小的输入光,底层软件将待校准光功率计采集

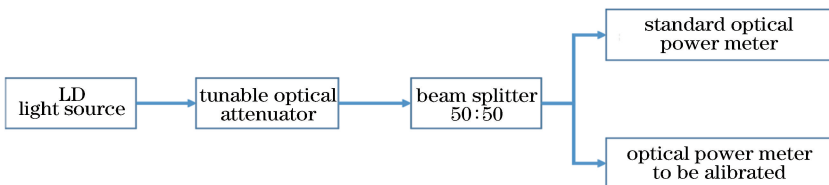


图 9 光功率的校准原理框图

Fig. 9 Principle block diagram of power calibration

到的数字信号值和标准光功率计采集到的光功率值之间建立一一对应的关系,即形成(ADC\_Value: Power\_Real)关系对,并存储于FLASH中。

此算法实现的思路是:系统校准完成后,当功率计模块采集到某一数字信号值时,将此值输入FLASH中建立的关系表,通过遍历,找到FLASH中覆盖此采样值的最小区间,再使用此区间对应的关系对,假设为(ADC\_Value1: Power\_Real1)和(ADC\_Value2: Power\_Real2),进行一次函数拟合,得到此区间内采样值和功率值的映射关系,再代入当前采样值,得到对应的光功率值大小。

#### 4.4 上位机软件设计

本系统使用C#语言进行上位机软件开发,它的优点是既有面向对象软件的高运行效率,又拥有丰富的控件资源,使其具备进行快速界面开发的能力<sup>[9]</sup>。上位机界面如图10所示,主要分为通信配置、设备出厂信息、设备功能配置、功率实施监控、设备实施数据、功率计功能配置等6个功能模块。

在通信配置模块中,将USB通信线连接好计算机和设备后,选择对应的端口,即可建立通信。

在设备出厂信息模块中,可以查询设备的序列号以及设备驱动固件的版本信息。

在设备功能配置模块中,包含了光源模块的全部设置功能和功率计模块的全部设置功能,具体来说包括光源的运行/待机、输出功率设置、输出波长设置、功率计的探测波长设置以及一键设备复位等功能。

在设备实时数据模块中,可以查询当前设备的状态信息、配置信息以及光源模块的实时输出和功率计模块的实时输入。

在功率计功能配置模块中,可以描绘功率计探测功率的实时曲线,可以实时计算出当前输入功率的最大值、最小值、平均值,也可以将数据导出至Excel文件。

在功率实时监控模块中,开启记录后,将功率计探测到的实时功率记录在此模块中。



图10 上位机显示界面

Fig. 10 Display interface on host computer

## 5 系统性能分析

### 5.1 光源性能分析

在常温实验室环境中,对光源性能进行测试,用标准ThorLabs标准功率计PM400和YOKOGAWA光谱仪AQ6370D作为测试仪器进行校准。

首先设置光源的输出功率为7.0 dBm,将输出光通过跳线连接至PM400,观测实际光功率值并记

录,多次重复,每隔0.1 dB设置一次,直至13.0 dBm,如图11所示。测试结果表明,在7.0 dBm~13.0 dBm的输出功率区间内,实际设置输出的值和标准功率计实测的值基本一致,最大误差不超过0.07 dB。

然后通过液晶触摸屏将光源的输出波长分别设置为1530, 1540, 1550 nm,再依次接入光谱仪AQ6370D,得到光谱图如图12所示。测试结果表明,本光源能够通过温控和电流驱动电路,实现控制

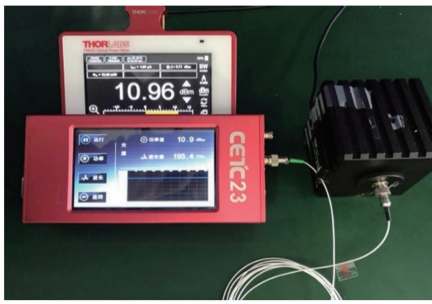


图 11 测试光源输出光功率

Fig. 11 Output optical power of test source

输出光波长的目的。并且输出光的边模抑制比(SMSR)大于50 dB,线宽小于1 MHz,相对强度噪

声低,具有良好的输出质量。

### 5.2 功率计性能分析

对本功率计性能在常温实验室环境中测试,用ThorLabs 标准功率计 PM400 和定标过的 LD 激光光源、可调衰减器、50:50 分束器作为测试仪器,具体的测试方法与图 9 所示的校准方法相同。通过可调衰减器调节输入 PM400 和本系统功率计模块中的 1550 nm 波长的输入光。以 PM400 为标准,从 -60 dBm 调节至 +20 dBm,每隔 10 dB 记录一次,记录结果如表 1 所示,结果表明本系统功率计模块的准确度和测量范围,与 ThorLabs 标准功率计 PM400 基本一致。

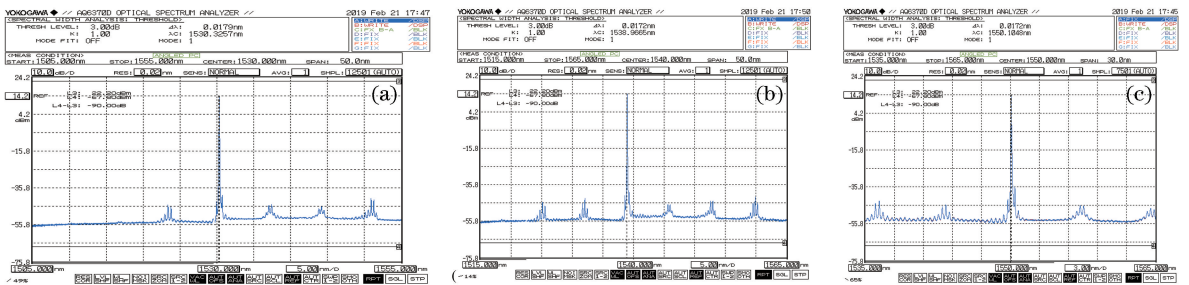


图 12 光源不同波长输出的光谱图。(a) 1530 nm;(b) 1540 nm;(c) 1550 nm

Fig. 12 Spectra of outputs at different wavelengths. (a) 1530 nm; (b) 1540 nm; (c) 1550 nm

表 1 1550 nm 波长准确度测试数据

Table 1 Test data of accuracy at 1550 nm

Number	Test data by PM400 /dBm	Test data by optical power meter /dBm	Absolute error /dB
1	-60.12	-60.08	0.04
2	-50.09	-50.02	0.07
3	-39.98	-39.90	0.08
4	-30.03	-29.96	0.07
5	-19.95	-19.89	0.06
6	-10.05	-10.03	0.02
7	0.05	0.08	0.03
8	9.98	10.05	0.07
9	20.01	20.05	0.04

### 5.3 便携性分析

以 EXFO 公司的手持式设备作为比较对象,除了性能上的优势以外,本系统用一半的体积集成了光源和功率计两种设备,并且采用全触摸屏的人机交互方式,大大增强了设备的便携性和可操作性。

## 6 结 论

本系统具备光源和功率计两部分功能,光源模块采用 OPA569AIDWP 芯片和 ADN8834 芯片为控制核心,分别设计出电流驱动电路和温度控制电路,两种电路均实现了优良的控制精度和稳定性,输

出偏差小于 0.07 dB。功率计模块通过使用低噪声、高响应的 InGaAs 光电探测器,采用独创的多挡位放大量程控制技术、屏蔽降噪技术、中位值滤波算法和分区间校准算法,显著提高了功率计的测量范围,并将线性度提升至 0.08 dB。另外,本系统采用液晶触摸屏和上位机两种方式进行人机交互,适用于实验室和工业现场等多种应用场景,大大扩展了系统使用范围和便携性。

### 参 考 文 献

[1] Zhou Z, Yang J, Qin Y. Design of optical power



- meter based on PIN photodiode [J]. Instrument Technique and Sensor, 2013(6): 43-45.
- 周真, 杨军, 秦勇. 基于 PIN 光电二极管的光功率计 [J]. 仪表技术与传感器, 2013(6): 43-45.
- [2] Yao Z H, Song S P, Hu X T. Design of optical power meter based on STM32 [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(11): 126-130.
- 姚志红, 宋寿鹏, 胡晓婷. 基于 STM32 的光功率计的设计 [J]. 电子测量技术, 2015, 38(11): 126-130.
- [3] Sun C, Han S L, Yan J S, *et al.* Design of a high sensitivity near infrared fiber-optical power meter [J]. Infrared, 2018, 39(4): 22-26.
- 孙超, 韩顺利, 闫继送, 等. 一种高灵敏度近红外光纤光功率计的设计 [J]. 红外, 2018, 39(4): 22-26.
- [4] Coldren L A. Monolithic tunable diode lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(6): 988-999.
- [5] Chen W. The study on dynamic behaviors of SGDBR lasers [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- 陈韡. SGDBR 可调谐半导体激光器的动态效应研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [6] Hu Z T, He B, Zhou J, *et al.* Research progress in thermal effect of high power fiber lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080002.
- 胡志涛, 何兵, 周军, 等. 高功率光纤激光器热效应的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080002.
- [7] Zuo P S, Ren H, Ren P A. Study on temperature automatic control technology for analog laser based on ADN8834 [J]. Measurement & Control Technology, 2017, 36(5): 74-76.
- 左朋莎, 任欢, 任培安. 基于 ADN8834 的模拟激光器自动温度控制技术的研究 [J]. 测控技术, 2017, 36(5): 74-76.
- [8] Wu W, Han S L, Hou X B, *et al.* Design of signal acquisition system based on near infrared two-color detectors [J]. Infrared, 2017, 38(6): 1-7.
- 吴威, 韩顺利, 侯喜报, 等. 基于近红外双色探测器的信号采集系统设计 [J]. 红外, 2017, 38(6): 1-7.
- [9] Zhang X, Gong X X, Ding Y Q, *et al.* Controllable fiber laser pulse light sources based on embedded control technology [J]. Laser Technology, 2016, 40(5): 711-715.
- 张翔, 龚心弦, 丁亚茜, 等. 基于嵌入式技术的可控光纤激光脉冲光源 [J]. 激光技术, 2016, 40(5): 711-715.